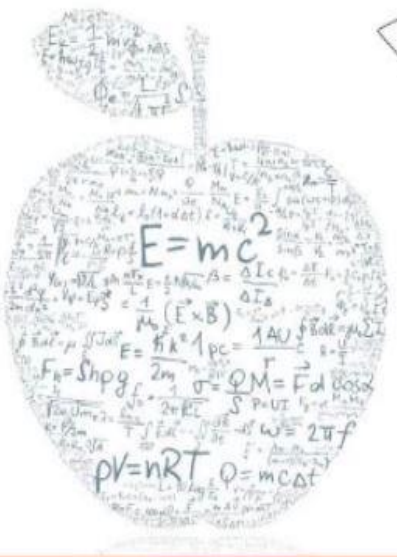
Inteligencia FÍSICA

Aprende a ver el mundo con la mente de un físico

Javier Santaolalla

Plataforma Actual



«El universo no solo es más extraño de lo que suponemos, sino más extraño incluso de lo que somos capaces de suponer.»
WERNER HEISENBERG

Inteligencia física

Aprende a ver el mundo con la mente de un físico

Javier Santaolalla

Plataforma Editorial

Primera edición en esta colección: abril de 2017

A mi padre

© Javier Santaolalla Camino, 2017
© de la presente edición: Plataforma Editorial, 2017

Plataforma Editorial
c/ Muntaner, 269, entlo. 1ª – 08021 Barcelona
Tel.: (+34) 93 494 79 99 – Fax: (+34) 93 419 23 14
www.plataformaeditorial.com
info@plataformaeditorial.com

ISBN: 978-84-17002-48-0

Diseño de cubierta y fotocomposición:
Grafime

Reservados todos los derechos. Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del *copyright*, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos. Si necesita fotocopiar o reproducir algún fragmento de esta obra, diríjase al editor o a CEDRO (**www.cedro.org**).

Índice

Introducción
1. El método científico
2. Cómo percibe el mundo un físico: la vista
3. Cómo percibe el mundo un físico: el oído
4. Cómo percibe el mundo un físico: otros sentidos
    El olfato
    El gusto
    El tacto
    Otros sentidos
5. Inteligencia intuitiva
6. Inteligencia formada
7. Inteligencia extrasensorial
    Relatividad
    Cuántica
8. Superinteligencia
9. A modo de epílogo. De lo pequeño a lo grande

Introducción

«Las revoluciones científicas, casi por definición, desafían el sentido común. Si todas nuestras nociones de sentido común acerca del universo fueran correctas, hace años que la ciencia habría resuelto los secretos del universo. La ciencia se propone quitar la capa de la apariencia de los objetos para revelar su naturaleza subyacente. De hecho, si apariencia y esencia fuesen lo mismo, no habría necesidad de ciencia.»

Es un extracto del libro *Hiperespacio*, de Michio Kaku, que muestra la esencia de lo que podríamos llamar «inteligencia física», el título de este libro, y que no consiste en otra cosa sino en ver más allá de lo obvio. Con esta «habilidad» nos mostramos capaces de entender lo que vemos, hacer modelos lógicos de lo que ocurre y predecir qué podría ocurrir en una situación distinta en función de lo que hemos aprendido, aplicando muchas veces ideas abstractas, más allá de lo que resulta inmediato a la vista. Esto es, básicamente, lo que conocemos como método científico, el pilar principal de esta «inteligencia física».

Pero no nos adelantemos demasiado, antes de desgranar todo lo que podría considerarse como parte de esta inteligencia, los elementos que la componen y las situaciones en las que la aplicamos cada día, conviene alejarse un pelín y entender esta idea dentro de su contexto. Y qué mejor forma que contarte una pequeña anécdota.

En uno de los muchos viajes que realizo con mi compañía, Big Van, Científicos sobre Ruedas, donde mostramos algunas de las maravillas de la ciencia en forma de «teatro científico», tuve la oportunidad de impartir un taller sobre comunicación de ciencia en Paraguay. Esto es un espacio más o menos académico donde intentamos motivar y dar pistas a los participantes de cómo mejorar las comunicaciones orales al incluir las llamadas técnicas

escénicas y narrativas. El último día de taller consiste en una exposición por parte de los alumnos del trabajo en grupo que han ido haciendo en el taller. Esta chica, a la que le tocaba en ese momento exponer, se planta en escena y suelta un: «¿Quién es más inteligente, Einstein o Messi?». Qué bien había aplicado uno de los pequeños trucos que les habíamos dado: «Empezar de una forma llamativa, que capte la atención del público y genere respuesta inmediata en la audiencia». Había dejado al público repitiéndose esta en apariencia ridícula pregunta. Había sembrado la semilla de la duda que respondería durante su exposición.

Uno de inmediato pensaría en responder «Einstein», obviamente, además. Y si hiciéramos un test entre el público lo más seguro es que esta fuera la respuesta obtenida. Pero espera... uno puede pensar: «Con todos los millones de euros que gana cada día, muy tonto tampoco puede ser este Messi, ¿no?». Es un pensamiento legítimo. Y esto puede hacer crecer la semilla de la duda en nuestro interior. Sin duda Messi puede tener un tipo de inteligencia diferente, y no resultar tener ni un pelo de tonto.

Quien quizás está mejor preparado para responder acertadamente a esta pregunta es Howard Gardner, profesor de la Universidad de Harvard y creador de la teoría de las inteligencias múltiples, que desarrolló en 1983. Estamos muy acostumbrados a asociar inteligencia con la capacidad de resolver problemas, al ingenio. Es esta misma la que se evalúa generalmente en los test de inteligencia, los famosos IQ. Sin embargo, la experiencia, y preguntas como la de esta alumna del taller en Paraguay, nos hacen pensar que este enfoque podría no ser el más adecuado. Inteligencia, nos dice Howard Gardner, es algo muy amplio, que va desde la capacidad de expresarnos correctamente (parte de la inteligencia lingüística), por supuesto también la de resolver problemas abstractos (parte de la lógica matemática), de tocar instrumentos o de seguir un ritmo (parte de la inteligencia musical) hasta la de chutar la pelota, recortar en el área o hacer un pase al hueco entre los defensas (parte de la corporal-kinestésica). En total son ocho los tipos de inteligencia que se establecen en este modelo de inteligencias múltiples: musical, lingüística, espacial o visual, naturalista, interpersonal, intrapersonal, corporal-kinestésica y lógico-matemática. Ocho inteligencias que por fin dotan de «inteligencia» a tantos profesionales hasta entonces desprovistos de ella: deportistas, artistas, políticos, diseñadores, bailarines, terapeutas, músicos, etcétera.

Nuestra pretendida «inteligencia física» se englobaría, por tanto, con toda justicia, en la lógico-matemática, aquella dedicada a los profesionales de la ciencia, las matemáticas y la ingeniería principalmente.

Pero no nos entretengamos demasiado con estas definiciones, que ya sabes que como científico mi inteligencia principal es la lógico-matemática, y no la lingüística, y volvamos al principio, a esta habilidad de entender nuestro mundo. La física podría definirse como ese campo que estudia la naturaleza (el espacio, el tiempo, la materia, la energía...) y las leyes que la rigen. Con tal definición podemos entender que todo, desde lo microscópico a las escalas cósmicas, absolutamente todo lo que vemos, nuestro entorno inmediato, nuestra casa, los coches, el aire que respiramos, nosotros mismos..., todo es física. Y por extensión, todos somos «físicos». Desde que nacemos estudiamos nuestro entorno, hacemos hipótesis, las probamos y aprendemos de ello, aplicamos continuamente el método científico como estrategia evolutiva inconsciente para aprovechar mejor nuestro espacio y nuestro medio. Entender el mundo ha sido, desde siempre, el mejor mecanismo de supervivencia y, como tal, estamos dotados genéticamente para estudiarlo. Somos todos, en potencia, físicos. Así, están impresos en nuestros genes ciertos comportamientos y formas de pensar genuinamente científicas, y en particular, propias de un físico.

Observen si no, un niño, un bebé. Cómo explora su entorno, cómo analiza

cada fenómeno que observa, buscando en cada caso aprender de lo que experimenta. Continuamente desde que nacemos estamos aplicando el método científico, y con él, estamos comportándonos como verdaderos físicos; queramos o no, nos demos cuenta o no, la biología ha determinado que pensar como un físico es la mejor forma de sobrevivir. De hecho, muchos de estos mecanismos son plenamente inconscientes, tanto que nos costaría reconocerlos como pensamientos científicos, pues son muy obvios, pero con un posterior análisis más profundo nos damos cuenta de que no lo son en absoluto: entender conceptos como el espacio o el tiempo, cuestiones que nos resultan hasta absurdas pero que a la vez son tan complicadas de definir por un científico; manejar el espacio y las tres dimensiones es algo que está grabado a fuego en nuestros genes y ni siquiera somos conscientes de ello; interpretar correctamente las señales de nuestros sentidos, nuestros cuerpos son sondas para explorar el espacio, la realidad pudiera ser muy diferente a lo que percibimos, sin embargo, manejamos nuestros sentidos de forma completamente automática, sin darnos cuenta de la cantidad de procesos físicos que a cada momento estamos desencadenando.

Y parece lógico. Son mecanismos fundamentales para la supervivencia. El ser humano se ha servido de estas reacciones inconscientes y de su habilidad para reconocer patrones como forma de protegerse y lograr una ventaja en su lucha contra otras especies. Son herramientas que permiten «predecir» el futuro y, por lo tanto, suponen una fuente de información muy rica para la toma de decisiones. Observar, explorar, experimentar y sacar leyes o hipótesis, aunque sea de manera inconsciente, fue la base de nuestra existencia y supervivencia, desde hace varios cientos de miles de años hasta la actualidad. No es, pues, de extrañar que aquellos homínidos con mejores dotes «científicas» tuvieran más probabilidad de sobrevivir y de tener descendencia. Aquellos que se orientaban usando las estrellas, o eran capaces de predecir la llegada de las estaciones, o usaban hábilmente utensilios a su disposición o incluso los creaban, tenían mejores opciones para transmitir sus genes. Ellos eran los mejores físicos del grupo.

Así que, después de la supervivencia del más fuerte, la supervivencia del que mejor se adapta..., llega la supervivencia del mejor físico. Un ser con mejores habilidades no ya de luchar y defenderse, sino de pensar y predecir el futuro usando su conocimiento. Este ser es capaz de sobrevivir y pasar sus genes de generación en generación.

Amigo lector, quieras o no, hay algo que nos une. A la vecina de arriba, al panadero de la esquina, a Michael Phelps, a Messi, a Isaac Newton, a ti y a mí: somos físicos. Eres el descendiente de toda una estirpe de físicos, heredero de un legado de ciencia. Vivimos en una sociedad científica y tecnológica, de seres que, aunque le dan la espalda a la ciencia, sienten correr por sus venas el instinto de un buen físico. Y sí, no todos de igual manera. De hecho, puede que a diferente nivel unos lo hayan desarrollado más que los otros, que lo hayan o no potenciado, lo hayan silenciado o dormido... Pero, no cabe ninguna duda: ¡somos física, y somos físicos!

De igual forma que cualquier otra inteligencia, la inteligencia física se puede entrenar y desarrollar, alcanzando diferentes niveles o cotas. Tal como hemos dicho al inicio del capítulo, la física va mucho más allá de lo que hasta ahora se ha mencionado, es decir, entender nuestro entorno, comprender el espacio o la energía. Como un entrenador Pokémon o un aprendiz de mago, podemos alcanzar diferentes niveles, desde lo inmediato hasta lo más abstracto, la mente del físico se va desarrollando, escapando de nuestra prisión física (el mundo de los sentidos) hasta dar respuesta a preguntas que permiten abarcar la inmensidad del cosmos. Esto lo da el estudio y el trabajo personal, el desarrollo profesional como físico, por ejemplo. Pero no te quejes, al contrario de lo que ocurre en otros campos, tú no empiezas de cero, ya naces como

físico, no eres nivel 0.

En este libro vamos a explorar estos diferentes niveles viajando por las distintas capacidades que va desarrollando una persona que potencia ese don inicial de la comprensión de nuestro espacio, lo que llamamos comúnmente «un físico». Así que, vagamente, el objetivo de este libro es «ver el mundo como lo ve un físico» o, si acaso, llegar a entender que la realidad es mucho más compleja y bella de lo que la simple apariencia muestra. Veremos que entender la física es observar el mundo con unas gafas diferentes, aquellas que nos permiten ver lo invisible, sintetizar lo complejo en sus leyes más simples, abstraerse de lo que es pensando en lo que podría ser, y mucho más que descubrirás si te atreves a emprender este viaje. Si lo haces, seguramente no vuelvas a ver el mundo de la misma manera.

Y para comenzar este viaje qué mejor que hacerlo por donde todo viaje empieza: «¿Por qué?». Esta es la típica pregunta resorte (inmediata) que hacen los niños sobre los ocho años, que puede llegar a ser molesta si se repite constantemente. Pero es una actitud muy sana y, como podrás ver dentro de poco, muy científica. En sí, la ciencia trata de dar respuesta a estos «porqués», además de los «cómos» y, por supuesto, los «cuántos». Y es un ejercicio verdaderamente estimulante, puesto que nos muestra no solo lo rica que es la naturaleza, sino también lo conectadas que están todas las áreas de la ciencia, en eso que ahora está tan de moda y que se llama interdisciplinaridad.

Pues hagamos como ese niño repelente que nunca se queda satisfecho con una respuesta, y no sabemos si lo hace por interés o simplemente por incordiar, pero devuelve una explicación con un nuevo «por qué». Un ejercicio que desde luego no es el primero que se hace de este tipo; puedes consultar *On a piece of chalk*, de Huxley, o la *Historia química de una vela*, de Faraday.

Tomemos una cuestión genérica, ya puede ser sobre el funcionamiento de un mecanismo, un fenómeno natural, cósmico, algún aparato de casa, algún experimento que hemos visto en YouTube o simplemente lo primero que se nos ocurra y apliquemos el método «niño repelente». Ya te adelanto, el resultado puede ser simplemente genial. La pregunta podría ser tan simple e ingenua, en apariencia, a algo como «¿por qué llueve?». La respuesta bien podría llevarnos por la absorción en el ciclo del agua, la evaporación, la ascensión de gases menos densos, la condensación del vapor en gotas, la coalescencia y la posterior caída del agua. Cada una de estas explicaciones podría arrancar un nuevo «por qué» que podría llevarnos a campos tan distintos como la termodinámica, la química, la teoría de gases o la gravitación. Sea uno u otro el caso, este experimento te lleva de forma ineludible a recorrer diferentes áreas de la ciencia hasta llegar a una pregunta más fundamental que la que inició la discusión. Más fundamental en el sentido de que da respuesta a un mayor número de fenómenos. Estamos descendiendo, como si de un árbol se tratara, de las preguntas más específicas, las hojas, bajando por cuestiones intermedias, las ramas, hasta las cuestiones fundamentales en ciencia, el tronco. Este delicioso ejercicio hará que te encuentres de forma sucesiva con diferentes áreas o especialidades, pasando de la biología a la microbiología, de ahí a la química, la física..., llegando inevitablemente al fin de la discusión: bien en la metafísica, en la filosofía, en la religión o mandando a tu interlocutor a freír espárragos.

Este ejercicio tan simple en apariencia tiene tres mensajes importantes plasmados en su resolución: las áreas diferentes están más estrechamente conectadas de lo que uno en principio podría suponer; la llamada física fundamental es la base de esta pirámide de conocimiento, por supuesto sin menosprecio implícito al resto de las ciencias, que por ello no dejan de ser igualmente importantes o necesarias, y no tenemos una respuesta para todo, cualquier línea de discusión como la propuesta acabará en última instancia en una pregunta que la ciencia como tal no es capaz de responder: la física, cuyo

objeto es dar respuesta a diferentes preguntas sobre la naturaleza y el universo, está incompleta o inacabada. ¡Por suerte!

Por medio de preguntas y respuestas podemos entrenar nuestra «potencialidad» física, desarrollando nuestra propia intuición en física. Y con ello estamos abriendo la puerta de una comprensión más completa del mundo. El objetivo de este entrenamiento es ver el mundo con otros ojos, entender la naturaleza de una forma absoluta. No solo de forma individual, entender cada fenómeno, sino interconectada, ser capaz de percibir la sutil conexión entre las diferentes áreas del conocimiento (que, por lo tanto, se encuentran artificialmente divididas). Así dejaremos de ver luz y empezaremos a ver ondas electromagnéticas desplazándose por el aire; dejaremos de sentir frío y empezaremos a entender los flujos de transferencia de calor entre dos cuerpos no aislados; dejaremos de caernos al suelo y empezaremos a ver la potencia de la fuerza que mantiene el orden cósmico de planetas girando en torno a estrellas con la fuerza gravitatoria. Y así con tantas cosas más.

Cabe preguntarse: «¿Y merece la pena?». Bueno, depende. Es a partir de este conocimiento que se establece su aplicación. Así es como hemos ido evolucionando socialmente hasta un «estado de bienestar» basado hoy en día, en los países desarrollados, en la ciencia y la técnica. Puedes replicar: «Pues que inventen otros». Bueno, depende. Como hemos visto, entender nuestro espacio y nuestro mundo ha sido una herramienta básica en la evolución, extenderla con el razonamiento lógico y abstracto no puede hacer sino mejorar nuestra adaptación y nuestras posibilidades de supervivencia. A lo que podrás replicar que hoy en día tu supervivencia no está en juego. Yo, aunque lo dude, podré zanjar esta discusión sin más que alegar que mirar al mundo con los ojos de la ciencia te hace ver un mundo más bello.

Esto último hace que se abra una discusión aún más intensa. ¿Entender un cuadro te hace verlo más bonito? ¿Pierde belleza una hoja sabiendo lo que es la fotosíntesis? En definitiva, ¿la parte humana del querer saber o entenderlo todo le resta belleza a la realidad? Es una pregunta legítima y muy interesante y que sirve como perfecto cierre a este capítulo.

Richard Feynman es uno de los científicos más brillantes de la historia. En física de partículas es cuestión de tiempo caer en uno u otro de sus desarrollos teóricos. Ideas en las que, de una forma muy original, Feynman mezcla la genialidad científica con la intuición, la creatividad, incluso me atrevo a decir, con el arte. Fue una persona excepcionalmente rica en ideas y dio lugar a explicaciones y teorías que resultaron genuinamente bellas. Es un personaje único, nada que ver con el estereotipo «Sheldon Cooper», el personaje de la serie *The Big Band Theory*, que combina sus excelentes dotes científicas con una personalidad afable, divertida, incluso cómica, lo cual le ha hecho ganarse un hueco entre los científicos más admirados de la historia. Puedes encontrar miles de anécdotas de esta personalidad tan excéntrica en sus propios libros de divulgación (tiene algunos muy buenos), en sus maravillosas publicaciones técnicas, en las entrevistas que le hicieron o en sus notas de clase. Un hombre que alcanzó las más altas cotas en física (fue premio Nobel en 1965) y que fue muy querido por sus compañeros y alumnos. Algunas de las cosas que dijo fueron absolutamente geniales, como, por ejemplo, en esta entrevista para la BBC en 1981.

> Tengo un amigo que es artista y a veces tiene un punto de vista con el que no coincido plenamente. Él sostiene una flor y dice: «Mira qué bonita es». Y yo estoy de acuerdo. Entonces, dice: «Yo, como artista, puedo ver su belleza, pero tú, como científico, lo desarmas todo y lo conviertes en algo aburrido», yo creo que eso es algo loco. En primer lugar, la belleza que él ve es la misma que ve otra gente, yo también; al menos, eso creo.
>
> Yo puedo apreciar la belleza de una flor y, al mismo tiempo, veo mucho

más en esa flor de lo que él ve. Puedo imaginar sus células, la acciones complicadas que tienen lugar en su interior, que también son bellas. Quiero decir que no es solo belleza en esa dimensión, en ese centímetro; también hay belleza a menor escala, en la estructura interna. También en los procesos. El hecho de que el color de la flor es una evolución para atraer a los insectos con el fin de que le ayuden en la polinización es interesante, significa que los insectos pueden ver el color. Lo cual agrega una cuestión: ¿existe el sentido estético a menor escala? ¿Por qué es así? Todo tipo de preguntas interesantes a las que el conocimiento científico solo contribuye a su emoción, misterio y asombro de una flor. Solo añade. No puedo entender cómo puede restarle.

Así que en este libro vamos a adoptar esta última postura, la de Richard Feynman, y vamos a explorar el mundo con las gafas de un físico para entenderlo porque es útil, porque nos ayuda en el día a día... o simplemente porque el mundo visto de esta forma es mucho más bonito.

1.
El método científico

Qué gusto da sentarse a la mesa un día especial, cortar tu jamón, uno cualquiera no, ibérico pata negra. Descorchar esa botella de vino que tenías guardada para las ocasiones especiales, una cualquiera no, un buen rioja. Y disfrutar la cena con una buena ración de gambas de Huelva, cogollos de Tudela, pimientos de Padrón y acabar con plátano de Canarias.

Las denominaciones de origen son herramientas que se usan para evitar la falsificación y garantizar ciertas cotas de calidad en el producto. Con la denominación de origen el productor protege su producto frente a abusos y al consumidor frente a engaños.

La denominación de origen de la física (y la ciencia en general) es el método científico. Es un sello distintivo que aglutina a todas las ramas de la ciencia y que sirve de referente a todas ellas. Como en el caso anterior, también sirve para proteger al producto (la ciencia) y para cuidar al consumidor (el ciudadano). Es seguramente el mejor invento que se ha hecho en ciencia desde que la ciencia es ciencia, un mecanismo propio, un proceso único, una metodología tan específica y controlada como la necesaria para alimentar a un cerdo y curar un jamón, o elaborar y reposar un buen vino. ¿Qué es ciencia? Lo que sigue el método científico.

La Grecia clásica es una época gloriosa y de grandes contrastes. Los griegos nos transmitieron un legado muy valioso que perdura hasta hoy en literatura, poesía, matemáticas, arquitectura... y ciencia. Y de contrastes, porque acertaron casi tanto como fallaron. Sí, fallaron, y mucho, y no solo en cuanto a predicciones o ideas, sino, más peligrosamente, en lo referente a procedimientos. Y por encima de todos los griegos, quien más influencia tuvo en su época y las venideras fue un discípulo de Platón, Aristóteles. En toda su

extensa y valiosa obra también transmitió ideas erróneas, como que el cerebro no recibía sangre y tenía la función de enfriarla mientras que el corazón era la fuente de la inteligencia, que el hombre era el único animal con músculos, que las mujeres tienen la sangre más espesa que los hombres, que insectos y peces nacían espontáneamente de la humedad y el sudor o que las moscas tienen cuatro patas. Desde luego también tenía ideas en física, donde estableció que la Tierra es el centro del universo o que los objetos más pesados caen más rápido.

Resulta paradójico, ¿verdad? Los griegos fueron capaces de adelantarse más de mil años en ideas tan elevadas como la existencia de átomos, sobre el vacío, incluso sabían que nuestro planeta no era plano y calcularon su radio mucho antes de que Colón se atreviera a viajar hasta los límites de la Tierra. Y luego fallan en cosas tan básicas... Es como encestar desde medio campo y luego fallar todas las bandejas... ¿Cómo personas dedicadas a observar, pensar y estudiar, que dieron con pensamientos tan modernos y avanzados, no repararon en que una mosca no tiene cuatro patas?

En la Grecia clásica se menospreciaba el mundo material, un mundo corrupto e imperfecto, que exploramos con nuestros defectuosos sentidos, que nos llevan a error. Platón, con el mito o alegoría de la caverna, nos muestra un mundo material (o sensible) que es un reflejo borroso de un mundo perfecto, el mundo de las ideas (o inteligible), que solo se puede explorar con la razón. Este pensamiento que desprecia el mundo material y los sentidos llevó a muchos filósofos influyentes de la cultura griega a dar la espalada a la observación y a guiarse simplemente por la razón, pero ¿cómo pensando y sin mirar podemos saber cuántas patas tiene una mosca? Difícil acertar.

De los muchos errores que transmitieron los griegos, el más peligroso era este último, el uso de la razón como fuente de todo conocimiento. Pues, ¿qué puede ser más contrario a la ciencia que el creer algo sin comprobarlo? El problema se hace más grave cuando la idea se eleva a categoría de dogma. Las afirmaciones de Aristóteles fueron abrazadas por la Iglesia católica, que castigó a todo aquel que se atreviese a ponerlas en duda a pesar de que muchas, como has podido ver, carecían de cualquier sentido. De ahí que la ciencia y el conocimiento en general en Europa quedaran enquistados durante más de quince siglos.

Se le atribuye normalmente a Francis Bacon, nacido en Londres en 1561, el gran honor de ser el padre de la ciencia moderna y del método científico experimental. Galileo Galilei, gran mártir de la ciencia, e Isaac Newton comparten el segundo puesto, al ser los primeros grandes exponentes de esta nueva práctica. Ellos fueron los que revolucionaron la ciencia derribando casi dos mil años de tradición, haciendo frente a creencias falsas, eliminando prejuicios y dudando de todo, instaurando la aplicación de la lógica y la deducción en el estudio basado en la experimentación y la observación. Según el método científico y la ciencia moderna ya no vale la razón pura como fuente de conocimiento; es de la repetida observación de donde este se obtiene. Pero ¿qué es el método científico?

Veámoslo con un ejemplo. Aristóteles decía que la velocidad de caída de un objeto era lineal con el tiempo. Es decir, si dejamos caer una pelota de lo alto de una mesa, el tiempo que tarda en recorrer la primera mitad de la distancia hasta el suelo es la misma que lo que tarda en recorrer la segunda mitad. Obviamente, esto lo dijo sentado en una piedra, ni se molestó en levantarse y dejar caer algo. Fue «guiado» por la razón pura.

Galileo Galilei fue un físico genial, muy en el sentido en el que lo fue Richard Feynman, brillante, elocuente, atrevido, original, creativo... Galileo sospechaba que muchas de las enseñanzas clásicas eran erróneas y se atrevió a ponerlas en duda. Vemos aquí uno de los primeros elementos de la ciencia moderna: la

duda y el escepticismo. En concreto se decidió a atacar la visión aristotélica de la caída libre. ¡Qué mejor para saber si está bien o está mal que realizando un experimento!

Galileo sospechaba que la teoría sobre la caída libre de Aristóteles no era correcta (**observación**). De hecho, propuso que la velocidad de un objeto en caída libre no era lineal con el tiempo (**hipótesis**). Así que se lanzó a idear un experimento (**experimentación**). Un objeto en caída libre va muy rápido, y recuerda que en esa época no existían los relojes, ni los cronómetros ¡ni el wifi! ¡Qué vida aquella! Así que la única forma de probar su hipótesis era en una caída no tan rápida como la caída libre. Tomó una rampa con una canalización y dejó caer una bola por ella. La rampa era tal que podía cambiar su inclinación. Galileo usó sus dotes musicales (era, parece ser, un buen intérprete con el laúd) para establecer los tiempos de caída, realizando las correspondientes medidas que le permitirían validar su hipótesis. Los resultados eran claros: Aristóteles estaba en un error, la caída libre de los cuerpos no es lineal con el tiempo.

Ya tenemos el método científico. Primero observamos algo que nos llama la atención. Luego lo queremos explicar y hacemos una hipótesis. Posteriormente probamos la hipótesis que hemos hecho con muchos experimentos. Si se observa que no hay desviaciones con respecto a lo que esperamos que ocurra, podemos decir que hemos probado nuestra hipótesis creando una teoría o ley física. Finalmente publicamos nuestros resultados para que todos puedan conocerlos y ponerlos en duda con nuevos experimentos.

FIGURA 1.1

Pero el método científico no se detiene aquí, porque toda verdad producida con este método está sujeta a continua revisión, es lo que se conoce como **reproducibilidad**. Junto con la teoría exponemos nuestro método para probarla, que puede ser repetido por cualquier persona en cualquier parte del mundo para comprobar su veracidad. La ciencia nos ha enseñado a dudar de toda afirmación porque podría estar realmente suspendida por alguna hipótesis falsa. Se realizan continuamente experimentos para poner a prueba todo conocimiento. De esta forma, al llegar a una ley quedamos en un bucle en el que seguimos preguntándonos por la veracidad de esta ley realizando

continuamente nuevos experimentos. El método científico está siempre en marcha.

¿Cuál es la correcta, la hipótesis de la caída libre de Aristóteles o la de Galileo? Es la de Galileo porque está basada en la experimentación. No por ser quien es, o por lo que hizo en vida, es simplemente porque así lo demuestran día a día los experimentos; el juez último de toda teoría científica es la naturaleza. No importa el tiempo que pase ni la forma en que se intente acallar una verdad, el método científico siempre la acaba mostrando. Por eso esta ley sigue en continua revisión, cada día, constantemente. Puede que seamos capaces de observar que no se cumple en una galaxia lejana y tengamos que cambiar esa ley por una más universal. Puede ser. Porque continuamente, en cada rincón del planeta, se realizan observaciones que ponen a prueba cada una de las verdades que conocemos gracias a la ciencia. Y este es el famoso método científico, la denominación de origen de cualquier estudio que quiera ser científico.

El método científico es robusto porque está basado en la continua observación y experimentación, es fiable porque compromete a toda la comunidad científica y está por encima de instituciones, personalidades y épocas, y es riguroso porque establece un método de trabajo y discusión. El método científico es una denominación de origen que protege a la ciencia frente a impostores y a los ciudadanos ante fraudes. Y es, en última instancia, la forma en que un físico explora su mundo. Gracias al método científico todo está en continua exploración, duda y revisión.

¿Significa esto que no podemos creer en nada? No, creeremos en ello hasta que se demuestre lo contrario. Porque una de las grandezas del método científico es que vamos construyendo un edificio, ladrillo a ladrillo, sobre el que vamos asentando el conocimiento. Un gran ejemplo de ello es que la ciencia no sirve solo para destronar leyes que dejan de ser ciertas cuando otra irrumpe apoyada por un experimento. Fíjate en esta preciosa historia del poder de la ciencia y el método científico.

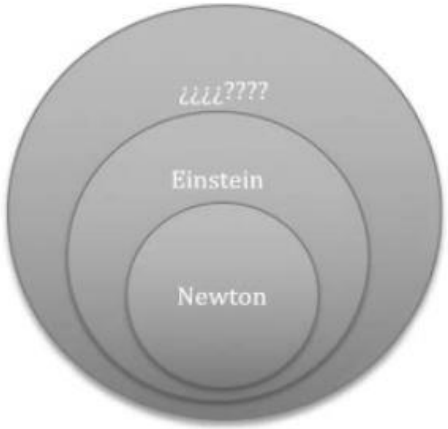
La ley de la gravitación de Newton irrumpió con mucha fuerza en el mundo de la ciencia convirtiendo a este científico en una gran celebridad. Tan bien funcionaba esta ley, basada en la observación, y a tantos fenómenos se había aplicado con éxito que cuando el electromagnetismo (la teoría de la electricidad, el magnetismo y también de la luz) fue comprendido con las leyes de Maxwell, desarrolladas unos doscientos años después, se llegó más o menos al consenso de que hacia finales del siglo XIX la física estaba acabada. No había nada más por descubrir, todo en el universo se entendía perfectamente. Los profesores alentaban a sus alumnos a introducirse en otros campos porque la física estaba acabada, esta rama de la ciencia se dedicaría a seguir mejorando las medidas, o hallando más decimales, tal como expresó públicamente uno de los mejores científicos de su época, lord Kelvin. Sin embargo, había algo que no encajaba. Las teorías de la gravitación de Newton y la del electromagnetismo de Maxwell estaban sutilmente en contradicción. Albert Einstein descubrió esta contradicción entre las dos teorías, la reciente desarrollada por Maxwell y la imperecedera teoría del gran Isaac Newton. Lo fácil habría sido intentar modificar la nueva teoría de la luz. Sin embargo, Einstein se atrevió a poner en duda el legado de Newton. Un joven que nunca había destacado en clase, que había fracasado constantemente en sus pruebas de acceso a la universidad y que trabajaba como un simple empleado en la oficina de patentes de Berna, ese chico estaba retando al mismísimo Newton, la mayor figura de la historia de la ciencia. Estamos a comienzos del siglo XX y hablamos de la teoría de la relatividad. Lo que hizo Einstein fue grandioso. Pero, eso sí, faltaba una demostración. Astrónomos de todo el mundo se lanzaron a la búsqueda de una prueba que demostrara que la teoría de Einstein era correcta. Einstein se lo había dejado

fácil, como él mismo indicó, solo tenían que mirar al cielo aprovechando un eclipse total de Sol (en 1919 hubo el primero a disposición) y apuntar a una estrella. Esta se vería desplazada de su posición esperada si la teoría era correcta. Uno de los más importantes astrónomos de la historia, Arthur Eddington, dio con ello y convirtió así a Einstein en un héroe.

Vemos aquí algo muy interesante. Y es que aunque esta teoría viene a desbancar a la teoría de Newton sobre la gravedad, esto no quiere decir que aquella sea totalmente incorrecta. Ni mucho menos, de hecho, se sigue usando cada vez que se lanza un satélite, para predecir el movimiento de planetas o para mil millones de cosas en la Tierra. Que sea desbancada solo quiere decir que su rango de aplicación es menor. Es decir, es una buena aproximación que podemos usar para miles de aplicaciones, pero cuando se quiere aplicar a otras situaciones llegamos a un punto en el que ya no funciona. Decimos que la teoría de Einstein contiene la gravitación de Newton. Es como... poner a un portero de delantero centro. En ese sentido la teoría de Einstein es más polivalente. Puede jugar de portero, como la de Newton, pero también lo puede hacer bien de central e incluso de lateral. Pero Newton sigue siendo un porterazo.

¿Habrá otra teoría que llegue a desbancar la teoría de Einstein? Seguramente; creemos, de hecho, que sí. Una teoría que ocupe todo el campo de juego. Esta teoría no hará que la de Einstein sea incorrecta, ni que deje de usarse. Lo mismo que la de Einstein significó para la gravitación de Newton. Sería una ampliación más válida que ambas en ciertos casos pero que se reduce a ellas cuando tratamos temas más generales.

FIGURA 1.2



Por lo que el método científico es un ciclo sin fin. Observación-hipótesis-experimentación, y repetimos hasta el infinito, siempre buscando la verdad por encima de todo. Es un sistema que favorece la crítica y la discusión, que permite la continua revisión de ideas y hace que solo florezcan aquellas que realmente valen.

El método científico define a la ciencia, qué es ciencia y qué no es ciencia, mostrando ser la mejor arma que tenemos para luchar contra la imposición del saber y los abusos en ciencia. Ambos corresponden a dos extremos viciosos opuestos en el uso de la libertad y ambos son muy peligrosos. El primero es claramente un exceso de celo, que impide la libertad de pensamiento. Es el caso de la histórica lucha de la Iglesia católica contra la ciencia, y que ya podríamos dar en general por salvada.

El que hoy más nos preocupa es el segundo y viene por un exceso de libertad, una libertad mal entendida. El poder de la ciencia y del método científico está en su veracidad, como ya hemos visto, en su robustez y fiabilidad. De ahí que muchas prácticas se vistan de ciencia por los beneficios

que tiene esta consideración.

O, de otra forma, digamos que nuestra denominación de origen tiene muchos... falsificadores. Hablo en concreto de las disciplinas que hoy conocemos como pseudocientíficas. Son ramas del conocimiento que se visten de científicas pero no lo son.

Entre ellas, nombro sin detenerme mucho en lo que suponen, se encuentran algunas muy populares como la astrología dentro de todas sus variantes, la homeopatía, las medicinas alternativas, el reiki cuántico y similares.

Has podido ver que la ciencia es más que una simple colección de conocimientos. Es una forma de pensar, una filosofía de vida, una manera de enfrentarse a una duda, un problema. Nos ha enriquecido y ha moldeado nuestra mente. Nos ha hecho más fuertes y menos vulnerables.

Así que ya tenemos un primer elemento de nuestro retrato robot de un físico: debe estar equipado con una potente máquina que implementa el método científico. Es una máquina que duda de todo y todo lo somete continuamente a prueba. Elabora hipótesis e intenta ver si son siempre correctas y, si no lo son, las modifica buscando que encajen con lo que ve. Son ideas que están continuamente en evolución y sometidas a evaluación, y que se comparten con otras máquinas, con otros científicos.

De esta forma podemos imaginar a un científico como una caja negra (esto se hace mucho en ingeniería). Fuera de la caja está el mundo exterior, lo que generalmente conocemos como naturaleza, con sus propias leyes. El físico interacciona con su entorno por medio de unas sondas que conocemos como sentidos. Los sentidos nos permiten observar la naturaleza de muchas maneras. Dentro, en la caja negra, tenemos nuestro procesador central, la máquina de método científico que creará hipótesis y elaborará experimentos para probarlas, lo que se ejecutará con los sentidos. Los resultados harán que esta máquina pruebe su hipótesis y, si es falsa, la rectificará.

Esto es parte de nuestra inteligencia física, unos sensores que nos conectan con el mundo y un método científico para evaluarlo y estudiarlo. Todo buen físico tiene dentro de sí una potente máquina de método científico. Veamos qué dicen los sentidos de nuestro mundo.

FIGURA 1.3

2.
Cómo percibe el mundo un físico: la vista

Es nuestra gran puerta al mundo. La vista posiblemente es el sentido que más nos conecta con nuestro entorno y uno de los órganos más complejos del organismo. No en vano el ojo es el fruto de la evolución durante unos pocos miles de millones de años, desde las primitivas células fotosensibles que ayudaron a los primeros organismos vivos a sobrevivir en un medio acuoso hasta el órgano tan sofisticado y especializado que es hoy. Todavía en pleno siglo XXI nos maravillamos con esta increíble obra de la evolución cuya reproducción sigue siendo un gran reto para la ingeniería.

El ojo es un órgano sensible a la luz. Apagamos la luz y no vemos, la encendemos y vemos. ¡Qué obvio!, ¿no? Pues no tanto. En principio un órgano puede ser sensible a muchas cosas, pero eso ya lo iremos viendo. La visión es posible gracias a, de forma muy resumida, tres elementos: una lente, un fotorreceptor y una unidad de análisis. Vamos, lo que viene a ser una cámara. La lente focaliza los rayos de luz para que formen una imagen, los fotorreceptores son lo que se conoce en ingeniería como transductores, los elementos que convierten la señal luminosa en una señal eléctrica, y la unidad de análisis es el cerebro, que es quien forma la imagen final.

La lente del ojo es una lente convergente que capta los rayos de luz y los concentra para formar imágenes. La córnea y el cristalino tienen particularmente esta misión, son la lente del objetivo. El iris regula la cantidad de luz que entra por la pupila, como un diafragma, cerrándose en situaciones muy luminosas y abriéndose en la oscuridad para permitir que entre el máximo de luz posible sin dañar la retina. El cristalino es flexible, lo que permite cambiar su capacidad de concentrar rayos de luz, lo cual se refleja en esa capacidad que tiene el ojo de enfocar objetos que están a diferente distancia. Esta es una característica fundamental y maravillosa: el ojo puede enfocar tantos objetos gracias a que está formado por lentes convergentes de distancia focal (es como se llama a esa «capacidad» de concentrar los rayos) variable.

En un ojo sano, el cristalino se moldea adecuadamente para enfocar objetos lejanos y cercanos, pero en cualquier caso vemos bien porque la imagen enfocada se forma en la pared interior del ojo, la retina. En óptica se estudia la formación de imágenes por lentes cóncavas y convexas. Una lente la define su punto focal o foco, el punto donde coinciden todos los rayos perpendiculares al eje de la lente. Otra definición importante es la imagen, lugar donde se forma nítidamente el objeto. En el ojo, la imagen se forma detrás del foco, a una distancia que depende de la distancia del objeto a la lente. Cuanto más lejos esté el objeto, más se aleja la imagen del foco. Lo importante es que el objeto se ve nítido justo en la imagen. Todo esto lo podemos probar en casa, de una forma muy simple. Los que no lo han hecho deberían probar a enfocar y desenfocar una lente de cámara, de microscopio o de proyector de diapositivas. Regulando el objetivo estamos cambiando el foco y, por lo tanto, el lugar donde se crea la imagen nítida. Lo importante es que veremos bien cuando la pantalla se sitúe justo donde se forma la imagen, en cualquier otra posición, veremos el objeto o la imagen borrosa. Vemos varias cosas entonces. Lo primero es que no se pueden enfocar objetos a diferentes distancias, situación que, creo, todos hemos experimentado. Lo segundo es que, como la pantalla de nuestro ojo, la retina, no se puede mover, para enfocar los objetos lo que hace un ojo sano es variar su lente, hacerla más o menos convergente por medio del cristalino. Tu ojo enfoca automáticamente.

De ahí vienen las famosas miopías e hipermetropías, dos defectos comunes en ojos que, además, son conceptualmente opuestos. Un ojo miope enfoca bien objetos cerca del ojo y muestra borrosos los objetos lejanos: el cristalino forma la imagen antes de la retina. Esto se corrige con unas lentes (gafas)

divergentes. La hipermetropía representa el caso contrario: la imagen se forma más allá de la retina, el ojo no es capaz de concentrar los rayos en los objetos más cercanos, nuestra lente no es suficiente, por lo que se corrige de nuevo con gafas, con cristales convergentes.

Hasta aquí nuestra lente, encargada de generar una imagen en la retina. Pero ¿qué hacemos con esa imagen? Veamos. La retina sería el fotorreceptor. Está en la pared interior del ojo y está cubierta por millones de células fotosensibles, los conos y los bastones. Los bastones son sensibles a la luminosidad y son más numerosos que los conos, mientras que los conos son sensibles, además, a los tres colores primarios, con lo que nos permiten dotar a la imagen de color. Estas células transforman la información lumínica en eléctrica, que transmiten a través del nervio óptico.

Finalmente, se genera la sensación de imagen. Eso se hace en el «centro de análisis» y este no es otro que el cerebro. Las señales del nervio óptico viajan como impulsos eléctricos desde la retina hasta la corteza visual primaria. Y lo hacen de una forma muy divertida: la zona izquierda de nuestro campo de visión llega al hemisferio derecho y viceversa. Esto no es todo, la imagen en la retina se forma boca abajo, es decir, invertida. Esto es una característica general de las lentes convergentes como la de nuestro ojo, no es ningún defecto, y hace que una primera labor de este centro de análisis sea la de corrección: poner la imagen del derecho. Otra labor es la de «pintar» la imagen, es decir, elegir una sensación de percepción distinta en función del tipo de luz que recibimos. Esto es algo muy interesante y un poco complejo, así que lo analizaremos con calma un poco más adelante, cuando sepamos bien qué es eso de la luz. En cualquier caso, lo más importante es considerar que es el cerebro el que crea la imagen, y no es otra cosa que una interpretación de los impulsos eléctricos que se generan en la retina. Aunque cueste asimilarlo, vemos con el cerebro.

Lente (córnea, pupila y cristalino), fotorreceptor (retina) y analizador (corteza visual) son los tres elementos que forman la imagen del exterior de nuestro cerebro. Una imagen que es una interpretación de nuestro exterior, no un fiel reflejo. Como ya veremos, nuestro mundo exterior es muy diferente de lo que percibimos. En cualquier caso, el ojo es un detector sensible a la luz. Ya dijimos que esto parecía obvio, pero... ¿y qué es la luz?

La luz es una onda electromagnética. ¿Te dice algo esto? Bueno, no te preocupes, vamos a intentar explicarlo, paso a paso. Una onda es una propagación de «algo» en el espacio. Decimos algo, porque en realidad la onda puede ser de cualquier cosa (los físicos decimos «magnitud» en lugar de cosa, es lo que sea que pueda medirse). Hay ondas de presión, de volumen, de materia, eléctricas, incluso de gravedad. Lo que todas tienen en común es cómo se transmiten por el espacio. Para entender bien lo que es una onda fijémonos en la más fácil de imaginar de todas, una onda de volumen de agua: una olita. No hay más que golpear la superficie calma de una masa de agua (un charco, el lavabo lleno...) o dejar caer algo de peso (una pequeña piedra) para ver cómo se forma una onda. Las moléculas de agua están enganchadas unas con otras de cierta manera, de modo que si tiras una hacia abajo, su vecina la seguirá. Enseguida la vecina de la vecina se entera y comienza a bajar, y luego es la vecina de la vecina de la vecina de la vecina..., vamos, el movimiento se propaga de la misma manera que lo hace un rumor. Con cierto retraso, la acción de la primera molécula se va contagiando en todas las direcciones a las vecinas, primero más próximas y luego al resto. Una vez abajo, la primera molécula volverá a su posición natural, subiendo, y contagiando ese movimiento de recuperación a sus vecinas, que harán lo propio, subir. Esto es una ola: desde un punto, donde se genera, la perturbación (el golpe en la superficie del agua) se va propagando en todas las direcciones. Sucede lo mismo con las «olas» que se hacen en los estadios de

fútbol, también sirve como ejemplo de propagación de una onda.

Fíjate que la materia, el agua, no está viajando en el espacio, es el movimiento vertical, abajo y luego arriba, el que se propaga en todas las direcciones. Esto es una onda mecánica (porque implica movimiento), transversal (porque las partículas se mueven arriba-abajo, perpendiculares al movimiento de la onda, que es hacia delante) y volumétrica (porque lo que se propaga es el volumen de agua). Otra forma muy interesante y muy visual de generar una onda es tomar una cuerda y agitarla de abajo arriba en un movimiento decidido y rápido. Verás cómo se propaga en la dirección de la cuerda.

Pues el funcionamiento de las ondas se conoce muy bien hoy en día. La teoría de ondas es una teoría muy bonita y muy completa, con funciones matemáticas que definen su propagación por el medio. Una cantidad fundamental para la comprensión de este capítulo dentro de esta teoría es lo que se conoce como longitud de onda. Una onda está formada por una consecución periódica de crestas y valles (la función matemática seno es una buena descripción de una onda). La longitud de onda se conoce como la distancia entre dos picos o dos valles. Es una cantidad constante dentro de esta onda, y en el caso de la onda en el agua se corresponde con la distancia entre dos olas.

Como ves, se necesita una magnitud (en nuestro ejemplo, el volumen de agua), un medio (en nuestro ejemplo es la masa de agua) y una perturbación en un punto (lo que se conoce como foco) para tener una onda.

La historia de la naturaleza de la luz es verdaderamente apasionante. Muchos científicos, entre ellos algunos muy conocidos, se enfrentaron a este dilema: intentar averiguar qué era la luz. El griego Aristóteles afirmaba que estaba formada por partículas. Pero nunca hizo ningún experimento para demostrarlo. Imagínate qué cuestión más complicada que por aquel entonces se pensaba que veíamos las cosas porque enviábamos algo que salía de nuestros ojos y rebotaba en ellas. Newton era otro de los científicos que, sin llegar a demostrarlo, pensaba que la luz eran partículas. Newton avanzó mucho en el estudio de la luz, en particular, fue capaz de explicar el arcoíris y entender que la luz blanca está formada por la combinación de los diferentes colores, pero fue incapaz de comprender la naturaleza de la luz. Unos años más tarde, un médico, Thomas Young, hizo un experimento que supuso una gran revolución. El conocido como «la doble rendija de Young» es considerado uno de los experimentos más bellos de la historia y permitía salir de todo tipo de dudas: la luz era una onda. Pero ¿una onda de qué? Para entenderlo debemos remontarnos en el tiempo.

La electricidad se conocía desde la antigua Grecia. Tales de Mileto fue el primero en Europa en dejar constancia de ello. Hablaba de unas piedras de ámbar que al frotar producían un efecto extraño. De ahí su nombre, ya que los griegos al ámbar le llamaban *elektron*. Es curioso que el mismo Tales también dejó constancia de unas piedras con un comportamiento extraño que fueron observadas en la ciudad de Magnesia: eran piedras que hoy llamaríamos imanes o magnéticas.

Hubo que esperar hasta los siglos XVI y XVII para que a estos dos fenómenos se les diera un enfoque de ciencia. Con Gilbert, Franklin, Coulomb, Galvani y Volta, entre otros, y por medio de mucho ingenio y experimentos se fue comprendiendo mejor la electricidad. De forma similar, en paralelo, como dos fenómenos completamente distintos, se hicieron grandes avances en magnetismo gracias a científicos como Gilbert, Ørsted, Gauss o Faraday. Fruto del trabajo colectivo, a finales de siglo XVIII ya se tenía una buena descripción de ambas fuerzas, con grandes avances, como, por ejemplo, la ley de Coulomb, con la que se podía calcular la fuerza eléctrica de cualquier conjunto de cargas. Pero aún más interesante: Ørsted, por casualidad (hay

gente con suerte), observó que la electricidad y el magnetismo estaban relacionados. Faraday confirmó esta conexión con una serie de preciosos experimentos. Todo esto acabó confluyendo en las famosas leyes de Maxwell, un conjunto que hoy expresamos como cuatro ecuaciones que describen completamente la electricidad y el magnetismo. No solo eso, estas leyes muestran la conexión tan íntima entre los dos fenómenos, hasta el punto de que hoy en día se ven como dos manifestaciones de una misma fuerza: la electromagnética. La solución de estas ecuaciones de Maxwell resultó ser la ecuación de una onda. Una onda muy curiosa, puesto que en ella magnetismo y electricidad se reforzaban mutuamente, creándose uno a partir de la otra. Me resulta muy divertido imaginar la cara que pudo poner el propio Maxwell cuando vio la velocidad a la que viajaba esta onda de electricidad y magnetismo: la velocidad de la luz.

Las ecuaciones de Maxwell no solo unieron electricidad y magnetismo en un solo ente, el electromagnetismo, sino que pusieron fin a la discusión sobre la naturaleza de la luz. La luz es una onda electromagnética, una propagación de los campos eléctrico y magnético en el espacio. Las ecuaciones de Maxwell fueron un grandísimo avance en la comprensión del universo y una de las teorías físicas más bellas.

En la luz, el campo eléctrico y el magnético viajan perpendiculares entre sí y a la vez perpendiculares a la dirección de propagación. Además, es la única onda que conocemos que no necesita de ningún medio para propagarse, la luz viaja perfectamente por el aire, a través del agua, pero también en el espacio vacío. Esto hace posible que nos llegue la luz de las estrellas. Aunque esta afirmación hoy nos parece muy natural, trajo de cabeza a muchos físicos, que se empeñaron una y otra vez en buscar el medio por el que la luz se propaga. Esto es el famoso éter, tan fantasioso e imaginario como los unicornios, el monstruo del lago Ness o los yetis.

La teoría de la luz, además, permitía explicar muy bien los colores del arcoíris: son vibraciones electromagnéticas con diferente longitud de onda, recuerda, distancia entre picos. Así, el verde se corresponde a ondas de más o menos 500 nanómetros de longitud de onda, el rojo, a los 650 nanómetros y el azul, a unos 430 nanómetros. En la luz blanca todas estas ondas viajan juntas; ya sabes que el blanco es la suma de todos los colores.

William Herschel en 1800 fue el primer científico en «ver» que hay más «luz» que nosotros no podemos ver. En efecto... ¿qué pasa con ondas electromagnéticas de menos de 400 nanómetros (más allá del azul)?, ¿y con las de más de 650 nanómetros (más allá del rojo)? Pues sí, son ondas que también existen pero que nuestro ojo no es capaz de detectar; como ya sabemos, los fotorreceptores de la retina no generan ninguna sensación lumínica para estas ondas y, por lo tanto, el cerebro no forma imagen para ellas. Pero existen tanto como el resto de colores. Hoy, estrictamente hablando, a estas ondas no las llamamos «luz». Esta palabra queda restringida para las ondas electromagnéticas en el «espectro visible», es decir, con longitudes de ondas entre los 400 y los 700 nanómetros. Por debajo del rojo hay un montón de ondas que conocemos como infrarrojas, microondas u ondas de radio, en función de la longitud de onda. Por encima del azul está la radiación ultravioleta, además de los rayos X y los rayos gamma. Es lo que se conoce como el espectro electromagnético. Como ves, vivimos en un universo mucho más rico que el que nuestros sentidos pueden percibir.

Las ondas electromagnéticas son parte fundamental de nuestra vida. No solo porque gracias a ellas vemos, literalmente, sino porque son la base de nuestras comunicaciones. Las antenas de móvil, wifi, las comunicaciones por satélite, los mandos a distancia..., todos funcionan por medio del envío y la recepción de ondas electromagnéticas de diferente longitud de onda. Cada longitud de onda representa una vía, una autopista por donde las señales se

pueden transmitir sin interferir en otras vías, los otros canales que operan a diferente frecuencia. Pero ¿cómo se generan estas ondas?

Cuando una partícula cargada, como un electrón, se acelera, emite una onda electromagnética; es lo que se conoce como radiación electromagnética, y es el principio de funcionamiento de, por ejemplo, todas las antenas. Este es uno de los principios fundamentales del electromagnetismo y se ve continuamente en la naturaleza. Dependiendo de cómo se acelere o desacelere esa carga, la radiación será de un tipo u otro. En general, se emite radiación electromagnética en muchos procesos, como en el salto entre orbitales en un átomo (lo veremos) o en las reacciones nucleares que tienen lugar en una estrella. Por lo común, cualquier cuerpo emite radiación en todo momento. Sí, como te cuento. La energía calorífica de un cuerpo se transforma continuamente en radiación; es lo que se conoce como radiación térmica. De hecho, el estudio de esta radiación dio lugar a una gran crisis en la física de finales del siglo XIX que se conoce como la catástrofe del ultravioleta y que tuvo como desenlace el nacimiento de una nueva teoría: la física cuántica.

Todo cuerpo en equilibrio térmico emite radiación, y esta se conoce como radiación de cuerpo negro. Es un tipo de radiación que no depende ni de la forma ni del material del objeto que radia, solo de su temperatura. Cuanto mayor es la temperatura de un cuerpo, menor es la longitud de onda a la que el cuerpo emite. A temperatura normal, se dice temperatura ambiente, la mayor parte de los objetos emiten luz en el infrarrojo (por eso no vemos las cosas en la oscuridad y este es el principio de las gafas de visión nocturna). Solo cuando se los calienta pueden empezar a emitir luz roja (de ahí lo de al «rojo vivo») para ir volviéndose azules según aumenta su temperatura. El color de un cuerpo negro es reflejo de su temperatura. Así, tenemos estrellas amarillas, como el Sol, pero también rojas y azules, en función de la temperatura a la que estén.

Esa es la luz que se emite, pero y ¿qué es lo que vemos? Pues normalmente lo que vemos no es sino un reflejo de la luz emitida sobre un cuerpo. Es verdad que hay cuerpos calientes que emiten luz que podemos ver directamente como el Sol o una bombilla. El resto de los cuerpos también lo hacen, pero en un tipo de radiación, la infrarroja, que nuestros ojos no detectan. Esos cuerpos, sin embargo, los vemos al iluminarlos, gracias a que reflejan la luz que reciben. Con la luz apagada en un cuarto de noche no vemos nada, la radiación de cada cuerpo está fuera de nuestro rango de percepción. En cuanto encendemos la luz, la bombilla emite luz, que llega a los objetos del cuarto. Estos objetos captan parte de esta luz y reflejan otra parte. Es esta luz reflejada la que hace que veamos esos cuerpos y, además, es la que los dota de color. Un objeto azul es un objeto cuyos átomos absorben toda la luz que les llega y reflejan solo la radiación de longitud de onda sobre los 400 nanómetros. Un objeto blanco es un cuerpo que no absorbe luz visible y, por lo tanto, lo refleja todo. Un objeto negro no lo vemos, porque no refleja nada, el negro no es un color, es la ausencia total de luz. Lo podemos distinguir porque todo en su entorno sí refleja. Ahora ya sabes por qué las cosas negras se calientan más.

¿Verdad que empiezas ya a ver con «ojos» de físico? El Sol emite luz a causa de los procesos nucleares que tienen lugar en su interior. Esta luz viaja como una onda electromagnética por el espacio vacío a la velocidad de la luz, trescientos mil kilómetros por segundo. Tarda, por tanto, unos ocho minutos en llegarnos desde que el Sol la emite. Del Sol nos llega luz de todas las longitudes de onda en función de su temperatura, unos seis mil grados en su superficie. Transforma setecientos millones de toneladas de hidrógeno en luz cada segundo, lo que hace que nos llegue, más o menos 340 vatios por metro cuadrado en nuestra atmósfera. Nuestra bendita atmósfera. La atmósfera no es transparente a esta radiación, al menos no a toda. De hecho, tan solo las

ondas en la región del espectro visible y las ondas de radio pueden atravesar la atmósfera. Esto es fundamental para la vida en la Tierra. Las ondas de alta energía son las que tienen la longitud de onda más corta, es decir, los rayos ultravioletas, los rayos X y los rayos gamma. Estas radiaciones son muy peligrosas para los seres vivos porque son tan energéticas que son capaces de romper cadenas de átomos en las células, lo cual puede llevar en muchos casos a enfermedades como el cáncer. La capa de ozono y otros gases de la atmósfera ayudan a absorber la radiación maligna. La dosis de radiación muy energética que nos llega es principalmente del ultravioleta, y de ahí que los médicos nos recomienden protegernos con crema solar de estos rayos.

La radiación llega a la Tierra, principalmente en el espectro visible, tras atravesar la atmósfera. Al incidir en los cuerpos, los calienta a la vez que estos reflejan parte de esta luz. La luz reflejada llega a nuestros ojos atravesando el cristalino, que actúa como una lente convergente. La imagen se forma en la retina, donde bastones y conos generan impulsos eléctricos asociados a la imagen que envían por el nervio óptico. La corteza visual primaria recibe estos impulsos y los interpreta, girando la imagen y asignando una impresión cromática (color) en función de la longitud de onda recibida en la retina.

Vemos con el cerebro, que es el órgano encargado de interpretar las señales de los ojos. Vemos un mundo externo a nosotros que pintamos en función de lo que nos envía. Pero el mundo no tiene colores, la realidad fuera de nosotros no existe tal como la vemos, es solo una sensación que genera el cerebro respecto a los estímulos que recibe. Y solo vemos una parte, aquella asociada al espectro visible de la luz. ¿Será casualidad que nuestro ojo sea solo sensible a la luz que justo la atmósfera deja pasar? ¿Vemos igual que, por ejemplo, los perros? ¿Qué nos estamos perdiendo de ver? ¿Cómo se entienden disfunciones como el daltonismo en este contexto? Te dejo pensar en ello.

Nuestra vista es sensible solo al espectro visible, y por suerte, si no estaríamos continuamente viendo las ondas de los móviles, las ondas del wifi, estaríamos saturados constantemente por la radiación que nos rodea. La vista es un sentido que nos ayuda a situarnos en el espacio. El ojo es un órgano fruto de cientos de miles de años de evolución que lo han convertido en un elemento fundamental para la supervivencia. Y es en función de esta que se ha moldeado. Vemos como *Homo sapiens sapiens* que dependen de cazar y no ser cazados para poder transmitir sus genes a la siguiente generación.

Plántate firmemente y mira a tu alrededor. Analiza todo lo que está ocurriendo de una forma tan simple y corriente como es abrir los ojos y observar. ¿Me vas a decir que no es bonito ver el mundo como lo hace un físico?

3.
Cómo percibe el mundo un físico: el oído

Aunque normalmente asociamos la vista al órgano más rico y complejo, suele ser la falta de audición la que más sensación de aislamiento nos produce. El oído nos conecta con nuestro mundo de una manera muy especial. Nos permite comunicarnos de una forma rápida y directa, nos alerta de posibles peligros y en general enriquece en gran medida nuestras sensaciones. El oído es en muchos sentidos complementario a la vista y nos permite explorar el mundo de una forma diferente.

El órgano del oído está formado por tres partes y funciona de una manera muy similar a un micrófono. El oído externo incluye el pabellón auditivo (la oreja, vamos) y el conducto auditivo externo, y su función es la de captar y canalizar los sonidos. En el oído medio están el tímpano y los huesecillos del oído, los famosos martillo, yunque y estribo. El tímpano es una membrana que vibra con los sonidos, que se transmiten como golpes en los huesos del oído. El sonido se amplifica y se transmite al oído interno, donde llega como vibraciones en un líquido, el líquido perilinfático. El oído interno transforma esas vibraciones en impulsos nerviosos gracias a unos pelillos (células ciliadas) y viajan a la corteza auditiva primaria, en el lóbulo temporal del cerebro, donde se genera la sensación de sonido. Nuevamente estamos hablando de una interpretación de nuestro cerebro ante una acción de nuestro entorno.

El oído es una máquina que transforma sonidos en sensaciones acústicas de todo tipo. Pero ¿qué es el sonido? El sonido es de nuevo una onda, es decir, una propagación «de algo» en el espacio, ¿recuerdas? Ese algo en este caso es presión, en general, del aire. Cuando agitamos el aire, por ejemplo al tocar la cuerda de un instrumento, la perturbación se propaga por el aire como una onda mecánica. Si imaginamos que las moléculas de aire son como bolas unidas por muelles, el sonido se propagaría como un empujón en la primera molécula que se acaba transfiriendo a sus vecinas. Algo parecido a lo que pasa con las fichas de dominó cuando las colocas una tras otra. Por cierto, no te molestes en agitar tu mano arriba y abajo, para que sea audible necesitas que ese movimiento sea muy rápido, al menos unas veinte repeticiones por segundo.

Entonces es una onda que se llama longitudinal (vibra en el sentido en el que se desplaza) y requiere de un medio. Hemos dicho que generalmente es el aire, pero el sonido también se propaga en otros medios, como en el agua o incluso en sólidos. En el aire se propaga a una velocidad en torno a los 300 m/s, que varía en función de la temperatura y la densidad del aire. En líquidos la velocidad de propagación es mayor (en agua, en torno a los 1.500 m/s) y aún mayor en sólidos (por ejemplo, cercana a los 4.000 m/s en madera). En general, su velocidad aumenta con la densidad del medio y con la temperatura. Eso sí, recuerda, sin medio no hay sonido. ¿Sabías eso de las películas espaciales en las que se ve a las naves haciendo ruidos enormes como explosiones? Pues todo es ficticio, en el espacio vacío el sonido no se propaga. No oirías absolutamente nada.

Como ves, la luz (las ondas electromagnéticas) y el sonido tienen muchas diferencias. La luz es una onda transversal, mientras que el sonido es longitudinal. La luz no requiere de un medio material mientras que el sonido sí. Pero centrémonos en sus similitudes, que son muchas y muy interesantes. Más allá de que ambas son ondas, por su forma de propagarse, los sonidos, como ocurre con las ondas electromagnéticas, se distinguen por su frecuencia de vibración.[1] Así, al igual que la frecuencia (o la longitud de onda) de una onda electromagnética hace que distingamos entre rayos X, rayos gamma o los colores del arcoíris, la frecuencia del sonido nos permite clasificar los sonidos.

Aquellos de mayor frecuencia los percibimos como más agudos, los de menor frecuencia, como más graves.

Nuestro oído es un órgano capaz de distinguir sonidos entre los 20 Hz (o 20 ciclos por segundo) y los 20 kHz (o 20.000 ciclos por segundo); cualquier sonido fuera de este rango no lo percibimos (no oímos nada). Cierto es que este rango es aproximado, puesto que la capacidad auditiva varía de persona a persona y se va deteriorando con la edad. Tú mismo con un ordenador te puedes hacer un test auditivo para estudiar cuál es tu rango de percepción del sonido. Quedamos en nada si nos comparamos con otros animales, como los perros, con un sentido del oído muy desarrollado, capaz de percibir por encima de los 60 kHz y a mayor distancia que nosotros, los humanos. Quizás ahora puedas entender que tu perro se moleste aparentemente por nada. Lo más probable es que haya registrado un sonido estridente y muy alto que tú no has llegado a percibir.

Al igual que dentro de nuestro espectro visible somos capaces de distinguir colores, en el espectro audible también lo somos de captar diferencias en la frecuencia de los sonidos. Nuestra capacidad de distinguir sonidos en función de su frecuencia es suficientemente sutil para poder clasificarlos; son las notas musicales. El do, re, mi de un piano o una flauta no son sino sonidos de diferente frecuencia, el equivalente al rojo, amarillo o verde en la vista. Y como en el caso de los colores, el nombre de las notas y su correspondiente frecuencia no deja de ser una convención humana: universalmente hemos convenido llamar «la» (o, para anglosajones, «A») a una vibración de 440 Hz (el «la» central del piano). Así es, de hecho, como se ha estandarizado y la forma en la que se afinan las orquestas de todo mundo. El resto de las notas se «arman» a partir de esta según una convención, nuevamente, que no deja de ser curiosa, y que comentaremos más adelante. En cualquier caso, no hay más que sentarse frente a un instrumento para comprobar que nuestro oído es bastante «fino» a la hora de distinguir diferentes frecuencias. Y da gracias, sin esta capacidad no habría música.

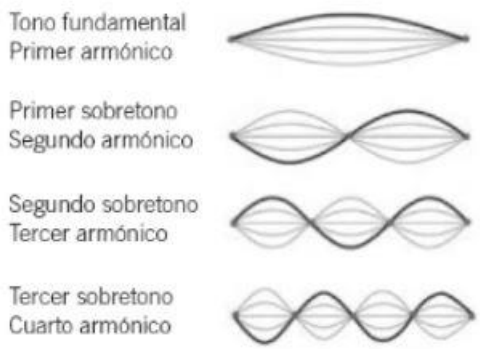
Hasta ahora hemos hablado de sonidos puros, notas. Pero en general si golpeamos fuerte una mesa, no suena un «do», si gritamos, si dejamos caer un tenedor, si escuchamos el ruido de un coche..., ninguno de estos sonidos nos recuerda al que produce un instrumento. Esto es debido a que estos sonidos son más complejos, están compuestos por una multitud de sonidos simples, de «notas». Esto es algo que parece natural, pero, sin embargo, no es nada obvio. Es gracias a Joseph Fourier, alguien con quien tienen pesadillas muchos ingenieros, que hoy comprendemos mucho mejor esto. La llamada transformada de Fourier realiza la descomposición de cualquier sonido complejo en sus componentes puras. Fíjate en la siguiente correspondencia: una vibración pura → sonido puro (sinusoidal) → una frecuencia exacta.

Un sonido complejo → suma de muchos sonidos puros (sinusoidales) → muchas frecuencias.

De esta forma podemos entender que el sonido que produce un tren, por ejemplo, es una composición de sonidos puros, notas musicales. Pero tantas y tan caóticamente distribuidas que no percibimos sus sonidos individuales.

¿Y cómo lo hace un instrumento musical para dar un sonido tan puro? Fijémonos en una cuerda, como en la de un violín o la de un piano. La cuerda está tensa y está fija por los extremos. Al tocar la cuerda (desplazarla) comenzará a vibrar. Pero no lo hará de cualquier forma... porque no puede, los extremos fijos se lo impiden. La vibración dominante, la que gana en amplitud, corresponde a la cuerda vibrando como un todo.

FIGURA 3.1



La siguiente en importancia es una vibración con un nodo. Ambas se conocen como la frecuencia fundamental y el segundo armónico. El resto de las vibraciones posibles se corresponden con vibraciones con dos nodos, tres nodos, y así sucesivamente, que no son sino el tercer, el cuarto y los consiguientes armónicos. Además, es muy fácil ver que todas estas vibraciones generan ondas de la frecuencia fundamental y sus múltiplos: el segundo armónico es el doble de la frecuencia fundamental, el tercero, el triple, etcétera. Así, del la central del piano, a 440 Hz, tenemos el segundo armónico a 880 Hz (un la una octava más alto), el tercero a 1.320 Hz (otro la a otra octava más)...

Todo esto está genial, porque, además, sonido fundamental y armónicos producen una sensación sonora similar (ve corriendo al piano o a cualquier instrumento que tengas cerca, un teclado *online* sirve, y prueba. Toca una nota y la misma a una octava mayor. ¿Cómo las percibes?). Digamos que se llevan bien, y es normal, puesto que se producen de forma «natural». Pero la pregunta es: ¿por qué en esa cuerda afinada a 440 Hz no se genera una vibración de 550 Hz o 620 Hz?, ¿o cualquier otra entre 440 Hz y 880 Hz? La respuesta es sencilla: cualquier otra vibración requiere que uno de los extremos se suelte. Podríamos decir que no «cabe» en esa cuerda fija por los extremos. Los extremos fijos fuerzan la vibración y anulan cualquier otra que no sea su frecuencia fundamental o sus armónicos. Esta es la maravilla de los instrumentos afinados, y ocurre de forma similar en todas partes, no importa cuál sea su naturaleza: una columna de aire (como en una flauta o un oboe), el vidrio de una copa...

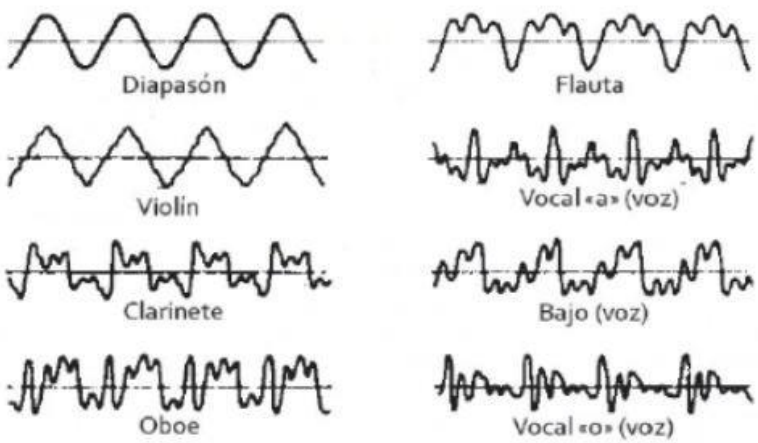
Por cierto, la nota que se percibe dada una determinada cuerda que está atada por sus extremos depende solamente de la tensión a la que se ate la cuerda y su longitud [$f = 1/2L\ sqrt(T/mu)$]. Observa: más corta la cuerda, mayor su frecuencia de vibración. Esta es la razón de la existencia de esos «tornillos» al final del mástil de las guitarras, que permiten cambiar la tensión de la cuerda, el valor de T, para variar la nota. Y también el motivo por el que la cuerda suena diferente al pisarla con el dedo, estás acortando la cuerda, haciendo L más pequeño y, por lo tanto, cambiando su sonido fundamental. Los trastes de la guitarra están puestos siguiendo esta ecuación, haciendo que pisar la cuerda en distintos trastes produzca las diferentes notas (si tienes una guitarra, puedes hacer la prueba: toma una cuerda y hazla sonar al aire y después la haces sonar pisando en la mitad de la cuerda. La nota tiene que ser la misma pero a una octava mayor, la frecuencia de vibración es el doble).

De hecho, veo que empiezas a notar cierta relación entre la música y las matemáticas. ¡Bien! Porque esta relación entre ambas está detrás de la escala musical. No en vano fue un grandísimo matemático griego, Pitágoras, junto con sus discípulos quienes primero dieron con estas relaciones. Haciendo uso de lo que se denomina monocordio, ellos observaron que una cuerda tensa produce sonidos consonantes en fracciones enteras de su longitud. Es decir, para una cuerda de longitud L, otra cuerda igualmente afinada de longitud $2\ L$, $3/2\ L$ o $4/3\ L$, produce con ella sonidos consonantes, agradables. Como ya sabes, la cuerda $2\ L$ produce la misma nota en otra octava que la L. Las

cuerdas de 4/3 *L* y 3/2 *L* producen lo que se conocen como cuarta y quinta. Buscando fracciones enteras entre *L* y 2 *L* (como 9/8) se completa la escala que conocemos: do, re, mi, fa... Para ya convencerte definitivamente sobre la relación entre matemáticas y música basta con recurrir a la media aritmética y a la media armónica, que al aplicarlas sobre las cuerdas de longitud *L* y 2 *L* nos dan nuestra quinta (3/2) y cuarta (4/3). *Quod erat demonstrandum*.

Pero volvamos al tema de la composición de los sonidos. Los armónicos aparecen en cualquier instrumento y los detalles de estos componentes adicionales son lo que le dan «timbre» al instrumento. Por eso un la de una flauta y de un contrabajo no suenan igual; aunque su frecuencia fundamental es la misma (su afinación), su distribución de armónicos los diferencia. Esto nuestro oído lo percibe como una nota pura (la fundamental) con su timbre (los armónicos).

FIGURA 3.2



Pero somos científicos, ¿verdad? Así que vamos a probarlo, que, además, todo esto es muy sencillo de ver. Toma un móvil u ordenador y descárgate una *app* de análisis de espectro (busca Spectrum Analyzer, por ejemplo). Lo que te aparece en la pantalla de la *app* es la descomposición de cualquier sonido que se emita en sus frecuencias fundamentales, es decir, su transformada de Fourier o su espectro. Un sonido muy puro se verá como un pico estrecho y definido, junto con sus armónicos a frecuencia doble, triple... Cualquier otro sonido lo verás como una conjunción de muchas frecuencias. Ahora haz experimentos con tu voz, con un teclado, con una copa de vino..., verás la riqueza de sonidos que puedes conseguir al alcance de tu mano.

Ya conocemos la descomposición espectral de un sonido, estamos listos para entender otro elemento fundamental en el ser humano relativo al sonido: el aparato fonador. No solo tenemos capacidad de oír, sino también de producir sonidos, lo cual nos dota de la maravillosa herramienta de la comunicación y su estrella: el lenguaje. Los sonidos se producen en el ser humano gracias a las cuerdas vocales y al tracto vocal, que trabajan conjuntamente para que se emita un sonido característico de cada persona y, además, si es el caso, entendible.

Las cuerdas vocales son unas pequeñas membranas o repliegues en la laringe, en la parte superior de la tráquea. En promedio son de unos 2 cm en los hombres y de 1,5 en las mujeres, lo cual hace que en estas la voz suene más aguda (recuerda que menor longitud de vibración, mayor frecuencia de sonido). Tienen forma de uve y funcionan como una compuerta (esas típicas de las naves de las películas futuristas). La compuerta se cierra al tragar (para evitar que entre comida en los pulmones), se abre al respirar y se entreabre para producir los sonidos. Así que ya empezamos mal, porque las cuerdas vocales... no son cuerdas. De ahí que su nombre más correcto sería algo como repliegues vocales.

Para emitir sonidos el aire pasa de los pulmones hacia el tracto vocal a

través de las cuerdas vocales. Estas, al estar entreabiertas, comienzan a vibrar generando el sonido. El sonido es a su vez modulado por el tracto vocal, lo que nos da la capacidad del habla. Nos referimos como tracto vocal al conjunto de laringe, faringe, cavidad oral y nasal, con sus respectivos órganos de articulación: paladar, lengua, labios, dientes... Todos ellos forman una caja de resonancia, un elemento fundamental que nos otorga el lenguaje. Fíjate cómo.

Situar el tracto vocal de una forma u otra (cambiando la posición de la lengua, por ejemplo) hace que unas frecuencias del sonido emitido se vean favorecidas y otras, en cambio, apagadas (fenómeno denominado resonancia). Las reforzadas son lo que se conoce como formantes y son el sello de identidad de las vocales que emitimos. Así, nuestro tracto funciona como un «molde» que modifica el sonido producido por las cuerdas vocales para darle una identidad, por ejemplo, lo que reconocemos como «a». Para emitir una «i» cambiamos el «molde», el tracto vocal, modificando la posición de los órganos de articulación, lo cual favorece a otras frecuencias del sonido emitido y genera una sensación acústica diferente. Los tres formantes que caracterizan al tracto vocal actúan como un código que nos permite distinguir entre vocales.

En resumen, el aire de los pulmones hace vibrar las cuerdas vocales para producir un sonido. La tensión y la longitud de estas membranas se puede modificar para variar la frecuencia fundamental del sonido producido. El tracto vocal le da información lingüística al sonido por medio de los formantes para generar un código con el que podemos comunicarnos.

Por suerte (¿de verdad crees que es solo suerte?) las frecuencias de los sonidos que emitimos (aproximadamente de 0 a 3 kHz) encajan perfectamente con el rango de audición del ser humano, así que lo que podemos decir puede ser también oído por otra persona en un acto tan bonito y enriquecedor como es la comunicación.

Y es de esta forma tan sencilla y bonita cómo un físico «escucha» su mundo. Ve ondas mecánicas que viajan por el espacio, que son producidas por una vibración y que recibe gracias a ese órgano tan desarrollado que es nuestro oído. Un oído que no solamente nos une a nuestro entorno gracias a este maravilloso sentido, sino que también nos otorga el sentido del equilibrio. El oído transforma esa onda de presión que recibe en impulsos eléctricos ricos en información que envía al cerebro para su interpretación. Esos impulsos eléctricos codifican los matices sonoros, el espectro del sonido, con una gran definición y convierte la escucha en una experiencia muy rica en información, que nos permite explorar mejor nuestro entorno y hace posible uno de los grandes placeres en esta vida, la música.

Un físico entiende que el ser humano ha dado una mayor dimensión a la capacidad de escucha, el sentido del oído, gracias al lenguaje. El oído no solo nos alerta de posibles peligros o nos da información útil para la supervivencia inmediata, sino que nos otorga una vía de comunicación directa, compleja y muy efectiva: el lenguaje. La evolución ha hecho posible en el ser humano un aparato fonador suficientemente desarrollado para incluir un código en los sonidos producidos con el que creamos una representación para objetos y conceptos abstractos, con lo que constituimos el lenguaje. La comunicación, de esta manera, mejora la cooperación entre humanos, facilita la transmisión de conocimientos y enriquece nuestras relaciones sociales. Todo ello gracias a un tracto vocal que permite modulaciones del sonido que los dota de identidad.

Y en el fondo de todo ello está, nuevamente, nuestro cerebro. Y es que al final nuestra escucha no es más que una representación cerebral de esa vibración captada con la que somos capaces no solo de escuchar el tono del sonido y sus matices: sonidos metálicos, suaves, estridentes, etcétera, con lo

que obtenemos una gran información, sino también una codificación algo más compleja como es el habla. El oído: una máquina evolutiva que completa nuestra percepción del entorno y nos convierte en unos físicos más preparados para sobrevivir en este mundo.

Y tú, ¿ya escuchas como lo hace un físico?

4.
Cómo percibe el mundo un físico: otros sentidos

Vale, lo reconozco. Mientras que para la vista y el oído he dedicado un capítulo completo a revisarlos, el resto de los sentidos los he metido todos juntos en uno. ¿Acaso son menos importantes? Es verdad que yo tengo un olfato particularmente desafortunado, o eso creo yo, pero no, ese no es el motivo. Un especialista en cada uno de estos órganos escribiría páginas y páginas sobre ellos, pero desde un punto de vista físico igual no tienen la riqueza que observamos en la distinción de colores en un rayo de luz o de frecuencias en una melodía. Es por esto por lo que existe en la carrera de física una asignatura dedicada a la óptica y otra al electromagnetismo, y en muchas facultades de física o ingeniería se dan contenidos de acústica, y no sobre estos otros sentidos. Aun así, hay mucha tela que cortar también con estos otros sensores que los humanos tenemos para conectarnos con el mundo exterior. Vamos con ellos.

El olfato

Muchos despreciamos el olfato como un órgano prescindible, pero su efecto va más allá de lo consciente. Para muchos especialistas es el órgano más desarrollado, capaz de distinguir entre más de diez mil estímulos diferentes (algún científico ha sugerido que podrían ser muchos más) y dar una respuesta muy rápida y con una grandísima sensibilidad, capaz de distinguir una molécula aromática en muy baja proporción. Además, es considerado el órgano más primitivo por su temprano desarrollo y por su conexión con las partes del cerebro relacionadas con los impulsos, las emociones y las

sensaciones más primitivas. Pero estamos interesados en la parte más «física» del proceso. Cuando un físico huele, ¿qué es lo que conscientemente está sintiendo que ocurre?

Los cuerpos emiten moléculas aromáticas, volátiles, que se mezclan con el aire. Estas moléculas son generalmente orgánicas, compuestos del carbono, aunque el olfato también es sensible a otro tipo de moléculas. En general, cadenas pequeñas de átomos que se desprenden de los cuerpos, por ejemplo, una flor. Cuando inhalamos, estas moléculas entran por nuestra nariz hasta la parte superior de las fosas nasales. Otra característica fundamental de estas moléculas para que puedan ser sentidas por nuestro olfato es que sean solubles. Si es el caso, se disuelven en la mucosa de la pared anterior de la nariz, donde habitan unos cilios, unos pequeños pelillos, que son sensibles a estos compuestos. La reacción que se produce es transformada en un impulso eléctrico que es transmitido al bulbo olfativo y de ahí al cerebro, donde la sensación, entre otras cosas, se hace consciente.

Pero vayamos con un poco más de calma para descifrar mejor todo esto.

La parte superior de la nariz contiene un tejido sensible a los olores recubierto por una mucosa. Es la pituitaria amarilla. Es en esta mucosa donde se disuelven las moléculas aromáticas. Cada molécula aromática «encaja» con un tipo específico de receptor químico en el epitelio, una de los millones de células olfativas que tenemos en la nariz y que conectan con la mucosa por los cilios. Estas células son neuronas, que envían los estímulos recibidos como impulsos eléctricos hacia el bulbo olfativo. El bulbo olfativo es ya parte del cerebro, de hecho, parte del conocido como sistema límbico, y está justamente detrás del hueso de la nariz. En el bulbo olfativo las neuronas forman agrupaciones sensibles a ciertos compuestos, a ciertos tipos de olores, lo que permite generar un patrón que hace reconocible cada tipo de olor. Este mensaje es enviado a diferentes regiones del cerebro para completar la sensación olfativa.

Lo curioso en este punto es que el mensaje se dirige tanto a la corteza frontal, donde se hace consciente la sensación, como al resto de los componentes del sistema límbico, tanto al hipotálamo y la amígdala, regiones del «cerebro primitivo» asociado a motivaciones y emociones inconscientes e instintivas, la rabia, el miedo o impulsos sexuales, y a la liberación de hormonas, como al hipocampo, donde se registran los recuerdos. Esta es la razón por la que el olfato se liga tanto con los recuerdos como con las emociones.

El olfato es un órgano muy sensible y con mucha influencia en nuestra conducta, tanto consciente como inconsciente. Y de muy rápida activación, por su conexión directa con el cerebro, hasta el punto de poder decir que es el único lugar del sistema nervioso central conectado con el mundo exterior. Además, el olfato participa, junto con el gusto, en crear una sensación placentera relacionada con la comida. Sí, sí, saboreamos la comida no solo con el gusto, sino también con el olfato. Y así es como huele un físico... y un químico.

El gusto

El sentido del gusto está situado en la boca y guarda una íntima relación con el del olfato. Gracias a este sentido somos capaces de percibir sensaciones diferentes que, en los alimentos, nos permiten distinguir entre textura, temperatura, olor y gusto.

Hoy en día se aceptan cinco estímulos gustativos diferentes: dulce, salado, ácido, amargo y umami. Si este último te suena a chino no vas mal encaminado, en concreto, es japonés, significa algo así como «sabroso» y es

un «nuevo» gusto asociado al glutamato, uno de los veinte aminoácidos presentes en las proteínas de la carne, el pescado y las legumbres.

El gusto es otro receptor químico (quimiorreceptor), es decir, la sensación se produce por una conversión de una reacción química en impulso eléctrico que se envía al cerebro. Los alimentos entran en la boca y ciertas moléculas estimuladoras se disuelven en la saliva. Estas moléculas incluyen azúcares, como la sacarosa o la glucosa, sales, como el cloruro de sodio o el de potasio, ácidos, como el ácido clorhídrico o el ácido cítrico... Las moléculas disueltas activan los quimiorreceptores, que se encuentran principalmente en la lengua y en menor medida en el paladar.

En la lengua tenemos las papilas gustativas, de diferente tipo según su forma y que le dan ese aspecto rugoso a la lengua. En su interior se encuentran los sensores del gusto, los botones gustativos, unos receptores de forma ovalada. En su parte superior aparece una abertura, que funciona como un poro, recubierto por numerosas microvellosidades, cómo no, una especie de cilios. En el poro se produce el contacto con un conjunto de proteínas, lo que induce cambios eléctricos en las células gustativas, que se traduce en los impulsos eléctricos que finalmente se envían al cerebro, que es quien lo interpreta como una sensación.

Sales, ácidos y demás moléculas estimulantes desencadenan en los botones reacciones diferentes, lo que permite a nuestro cerebro distinguir los cinco grupos gustativos. A esta sensación se une la del olfato. Al estar boca y nariz conectadas internamente, las moléculas volátiles de la comida se internan en la nariz y activan los procesos olfativos que antes mencionamos. Por ser esta vía más rápida, podemos decir que primero «saboreamos» la comida con la nariz y luego con la boca.

Así que el sentido del gusto está concretamente en los botones, esos receptores que se encuentran sobre todo en las papilas gustativas de la lengua, distribuidas por su superficie, y nos permite discernir entre los famosos dulce, salado, amargo y ácido, y el no tan famoso y bastante polémico umami o sabroso. Y, ojo, como puedes ver, nada tiene de cierto ese mapa de sabores en la lengua, tan popular en los libros de texto, que sitúa el dulce en la punta de la lengua, el amargo en la parte anterior y el salado y el ácido en los lados. Este mapa parece ser un error de traducción de un estudio de principios del siglo XX y que por lo visto caló hondo entre el público.

Por si fuera poco, el gusto es importante para iniciar el proceso de salivación y digestión, algo que puedes comprobar fácilmente comiendo un buen *mousse* de chocolate *fondant* sentado en el sofá de casa. Como buen científico debes repetir esta operación sucesivamente para comprobar el resultado.

El tacto

Es el incomprendido de los sentidos. Como no está concentrado en un órgano concreto, como la vista o el oído, sino que está repartido por todo el cuerpo, apenas reparamos en la importancia que tiene. Nos alerta de posibles peligros, nos conecta con nuestro entorno inmediato y amplía las sensaciones que se perciben con otros sentidos.

Se concentra principalmente en la piel, en sus tres capas: epidermis, dermis e hipodermis, y funciona como un gran sensor que mide temperatura y presión, además de tener un sistema de alerta relativo al dolor. Un físico se imagina un ser humano como una máquina recubierta de pequeños sensores, mecánicos y térmicos, como los que se instalan, por ejemplo, en las industrias. Sistemas que miden la presión o la temperatura de un agente y la transforman en un impulso eléctrico que mandan al cerebro a través de la

médula espinal.

Repartidos por todo el cuerpo tenemos corpúsculos de Meissner (presión, características de los objetos), corpúsculos de Pacini (presión, sensibles a presión profunda en la piel, alta frecuencia, solo sensibles al inicio y al final de la presión), corpúsculos de Ruffini (temperatura, registran calor y deformaciones de la piel), los corpúsculos de Merkel (presión, dan información de presión de baja frecuencia, presiones continuas en el tiempo) y de Krause (temperatura, sensación de frío).

Además, en nuestra piel contamos con receptores específicos para la sensación de dolor, los nociceptores. Son sensores que se activan cuando los estímulos en temperatura o presión superan ciertos umbrales.

Los sensores que conforman el sentido del tacto están repartidos por todo el cuerpo, varios cientos de miles de ellos, pero de forma desigual. El premio se lo llevan las partes más importantes en lo relativo al estudio de nuestro entorno. Pues ya puedes imaginar...: manos, labios, lengua y, obviamente también, los órganos sexuales. Todo esto representado da lugar al conocido como homúnculo de Penfield, un dibujo de un ser humano donde las partes más sensibles (por tener más sensores de temperatura y presión) se representan destacadas, con un mayor tamaño relativo.

Yo me imagino un ser humano como cuando para hacer un reconocimiento médico a un jugador lo llenan de sensores por todo el cuerpo para monitorizar cada respuesta corporal. Los sentidos nos conectan con nuestro entorno, tanto físico como social. Son pequeños transductores que transforman un estímulo (presión, luz, sabor...) en un impulso eléctrico que se envía a nuestro centro de procesamiento de datos, el cerebro. El de un científico implementa el método científico para la toma de decisiones, como ya sabes.

Por cierto, cuando tocamos algo lo que está ocurriendo es que los electrones de las capas externas de las dos superficies «en contacto» se repelen. En realidad, nada entra en contacto, por eso las comillas, lo que sentimos como tacto es realmente repulsión eléctrica entre cargas del mismo signo. Y sí, no importa que sea una caricia..., cualquier tipo de tacto es el resultado de una intensa repulsión.

Otros sentidos

Pero, lo has adivinado, un científico no es una persona «normal». Cinco sentidos claramente no le bastan, y tranquilo, no estoy hablando de poderes paranormales ni del séptimo sentido de los caballeros del Zodiaco ni nada que pueda salir en *Cuarto Milenio*, te hablo de los instrumentos de medida.

Como has podido comprobar, nuestros sentidos son nuestra conexión con el mundo que nos rodea. Son nuestro mejor aliado para explorar el mundo, pero a la vez una limitación. Habrás notado que detrás de cada uno de ellos hay una «presión evolutiva», un sentido biológico. Ojo, oído, olfato... se han desarrollado en función de las características del ambiente, de nuestro entorno, de la vida en la Tierra. Los sentidos se han ajustado o afinado según estas condiciones particulares, útiles para la supervivencia, pero claramente insuficientes para explorar un universo mucho más rico de lo que está al alcance de nuestros sentidos.

Así, por ejemplo, nuestro ojo solo es sensible a las longitudes de onda en la franja que conocemos como visible, que se corresponde con una región del espectro en la cual la atmósfera es transparente. ¿Casualidad? Seguramente si la atmósfera bloqueara esa parte del espectro luminoso nuestro ojo no sería sensible a ella.

Los sentidos nos muestran una visión del mundo exterior útil para nuestra supervivencia, pero esconden muchos aspectos de la naturaleza necesarios

para entenderla. Vemos un guepardo a diez metros, pero no podemos ver un átomo; podemos distinguir un lugar frío de uno caliente, pero somos incapaces de conocer la temperatura con precisión o fuera de nuestra escala de temperaturas; oímos nuestras propias voces, pero somos sordos al resto de los sonidos de la naturaleza. Los instrumentos de medida extienden la capacidad de explorar el mundo exterior que tenemos más allá de nuestros sentidos.

Y esto es muy útil porque al universo le importa más bien poco la supervivencia del ser humano, de manera que sus leyes están escritas de un modo que no tienen por qué estar al alcance directo del hombre, en un lenguaje entendible para él. El universo es mucho más rico que nuestra limitada vida en la Tierra, y para poder entenderlo vamos a necesitar que nos echen un buen cable.

Yo, que tengo mucha imaginación, me imagino a un científico como un inspector Gadget o, para los más jóvenes, un Iron Man. Fíjate en Iron Man, es un superhéroe sin superpoderes. Bueno, tiene los poderes que le confieren sus artefactos. Algo así es un científico, una persona con superpoderes, aquellos que le otorgan sus propios experimentos.

Como supervisión, por ejemplo. Con los telescopios podemos ver mucho más lejos de lo que nuestra vista nos permite. Desde que Galileo usara ese instrumento para mirar al cielo, nuestro conocimiento del espacio ha estado necesariamente ligado al desarrollo de cada vez más grandes, más precisos y mejores telescopios. Tanto en tierra como en el espacio. Los telescopios espaciales, como el Hubble, que evitan la perturbación atmosférica, nos mandan cada vez imágenes más distantes y claras del universo.

No solo para objetos lejanos, también cercanos. Tenemos supervisión para ver objetos tan pequeños que nuestra vista no repara en ellos. Los microscopios nos abren las puertas del mundo microscópico y amplían las capacidades de un físico de explorar su entorno.

Un científico, con su supervisión, ve lo invisible, esa luz que el ojo no es capaz de captar. Así, un científico puede ver más allá de la radiación visible, la que ve cualquier «simple mortal». Con antenas y telescopios puede observar el universo en cualquier otra región del espectro. En la región más energética, la de rayos gamma o rayos X, nos muestra los sucesos más violentos del universo; con las ondas de radio podemos estudiar la estructura del universo o la formación estelar; con las microondas podemos ver la radiación fósil del Big Bang... De la luz, como de un cerdo, se aprovecha todo.

Incluso podemos ver en la oscuridad. Las cámaras de visión nocturna aprovechan la radiación térmica en el infrarrojo para ver sin ser vistos. Un prodigio de la ingeniería y la técnica basado en un conocimiento físico.

Y no solo supervisión, supertacto también. Continuamente nos atraviesan miles de partículas. Aprovechan que un átomo es casi todo espacio vacío para pasar a través de nuestros cuerpos sin que lo percibamos. Un ejemplo son los neutrinos, unas partículas que se generan en las reacciones nucleares o en la radiactividad y que atraviesan continuamente la materia. O los muones, hermanos pesados de los electrones y que por sus propiedades pueden atravesar nuestros cuerpos sin que notemos nada.

Son partículas que no podemos sentir con nuestro tacto, el de un ser mundano, pero un científico tiene la forma de cazar estas partículas con su supertacto. Con detectores de partículas la presencia de estas se hace evidente y podemos «sentirlas». Un ejemplo son las cámaras de niebla, un dispositivo donde las partículas, al pasar, dejan su rastro en forma de pequeñas burbujas. O su evolución moderna, las cámaras multihilo. Detectores de silicio, centelladores, cámaras de deriva..., artilugios de todo tipo para poder «sentir» lo que a nuestra piel se le escapa.

¿Y qué me dices de las medidas precisas que hacemos de presión,

temperatura o calor, que realizan nuestros instrumentos en analogía a como lo hace nuestra piel pero con mucha mayor precisión? Y en rangos donde nuestra piel no es operativa y sin los riesgos que supone poner un brazo, por ejemplo, a más de mil grados de temperatura. Tenemos medidores de temperatura en el espacio, y bajo tierra, en lugares muy difícilmente accesibles para un ser humano... normal. Nunca para un científico.

Por tener, tenemos hasta superolfato/supergusto. Dispositivos que son sensibles a la composición química de un compuesto. Trazadores, indicadores, espectrómetros de masa..., sistemas que hacen análisis químicos para discriminar compuestos que con nuestro olfato o gusto no podemos, ¡ni queremos!, conseguir.

Con ultrasonidos podemos jugar para llegar donde el ojo no puede alcanzar, atravesando capas que no son transparentes a nuestra vista. Es nuestro superoído, con una superaplicación: la representación de la realidad por el efecto del eco. Algo similar a como se orienta un murciélago o como funcionan nuestros radares. De esta forma se hacen ecografías, imágenes por ultrasonido del cuerpo humano.

También podemos usar ultrasonidos para completar nuestra visión y ver objetos que no están a nuestro alcance visual porque la luz no es capaz de llegar, por ejemplo, al estar sumergidos a gran profundidad. Para eso usamos el sonar, una variante del radar en el que se usan ondas acústicas en lugar de ondas electromagnéticas. De nuevo, un superpoder solamente al alcance de un científico.

Y hay más, porque donde haya una magnitud, hay una medida posible, aunque nuestro cuerpo no esté capacitado para sentirlo. Somos sensibles a la luz, a los sonidos, a la presión, temperatura, componentes químicos..., pero... ¿y a las ondas gravitacionales? ¡A eso claro que no! Y, sin embargo, hemos desarrollado dispositivos capaces de detectar estas ondas con gran precisión. Sistemas con los que podemos «observar» el universo de una manera que nuestros sentidos no nos permiten. «Vemos» el universo de una forma distinta y nos acerca a lugares y momentos de la historia del cosmos inaccesibles con el resto de los sentidos.

GPS para localización y temporización precisa, mucho más que nuestros relojes biológicos; osciloscopios, contadores Geiger, células de carga, reconocedores de voz, Siri...; un físico tiene una vista mejor que un halcón, un oído mejor que el de un murciélago, un olfato mejor que el de un perro..., un físico es un ser humano con superpoderes. ¿Todavía no estás convencido de querer ser un físico?

5.
Inteligencia intuitiva

Como ya analizamos en el primer capítulo, en nuestro camino para ver el mundo como un físico no partimos de cero. Por suerte nacemos con unos instintos que realmente, de forma inconsciente, responden a principios físicos. De hecho, algunas de nuestras reacciones no conscientes son una respuesta tan óptima a la situación que parecen el resultado de un arduo estudio físico-matemático. No es así. Lo mismo que la evolución ha esculpido órganos, miembros, incluso organismos enteros en un ejercicio de optimización en esa lucha por la supervivencia, también ha hecho lo propio con las respuestas inconscientes.

Es claro que el cerebro ha sido el elemento estratégicamente clave para el desarrollo y la prosperidad del *Homo sapiens sapiens*. Así, nuestra especie ha conseguido consolidarse y expandirse como una especie dominante dentro del ecosistema terrestre. Y lo ha hecho gracias a la ventaja evolutiva que nos ha otorgado el uso de un órgano muy desarrollado con el cual hemos creado utensilios para cazar y defendernos, un lenguaje para comunicarnos y tantas otras herramientas que hemos tomado de nuestro entorno para facilitar nuestra supervivencia y también nuestro bienestar.

Una capacidad especialmente útil en ese cerebro primitivo era la de distinguir patrones, reconocer sucesos repetidos o cíclicos. Esta capacidad nos ha permitido predecir sucesos, reconocer cambios, conectar causas y efectos; nos ha hecho posible elaborar leyes e hipótesis: nos ha hecho científicos. Desde reconocer patrones en las estrellas para orientarse mejor hasta observar patrones en la naturaleza para adelantarse a épocas de lluvia o de sequía, esa habilidad de encontrar patrones y realizar hipótesis ha sido desde siempre nuestro mejor aliado para la supervivencia. No ha de extrañarnos que los *Homo sapiens sapiens* que mejor se adaptaron a su entorno y con más facilidad transmitieron sus genes fueron los que estaban dotados con una mayor habilidad científica.

Somos descendientes de esos ancestros bien capacitados para el estudio mecanizado del entorno, la experimentación, la prueba y error, el método científico. Sí, nacemos científicos, llenos de pequeñas reacciones inconscientes que hacemos sin saber por qué, pero que obedecen a estrictas reglas físicas, leyes que ni siquiera muchas veces sabríamos reconocer. Y las identificamos como tales, ¿o acaso has dudado al tirar una pelota al aire si la gravedad seguiría funcionando como ayer?, ¿o al ponerte a calentar el agua si seguiría hirviendo a la misma temperatura? Identificamos patrones, hacemos hipótesis y las convertimos en leyes. Son reacciones que nos son naturales, están escritas en nuestros genes y nos convierten en físicos o científicos natos.

En este capítulo te voy a mostrar algunas de estas reacciones inconscientes, muchas de ellas las reconocerás como propias e incluso te sorprenderán. Eso basta para reconocer que para ver el mundo como un físico ya has dado un primer paso, tu instinto y tu intuición van a ser tus primeros aliados. Es lo que he venido a llamar el nivel 1 de un aprendiz de física.

Una ley que sigue rigurosamente la naturaleza en muchísimas circunstancias es la ley del cuadrado-cubo. En serio, aparece por todos los lados, no hay más que abrir los ojos para encontrarla. Esta es una ley de escala que nos dice que cuando una propiedad depende de la relación entre el volumen y la superficie de un cuerpo, el tamaño influye mucho. En otras palabras, algo puede funcionar en miniatura, pero si lo replicas a gran escala, las cosas dejan de hacerlo. Esto ocurre porque el volumen crece mucho más rápido que la superficie de un cuerpo cuando este aumenta de tamaño, o, técnicamente, el

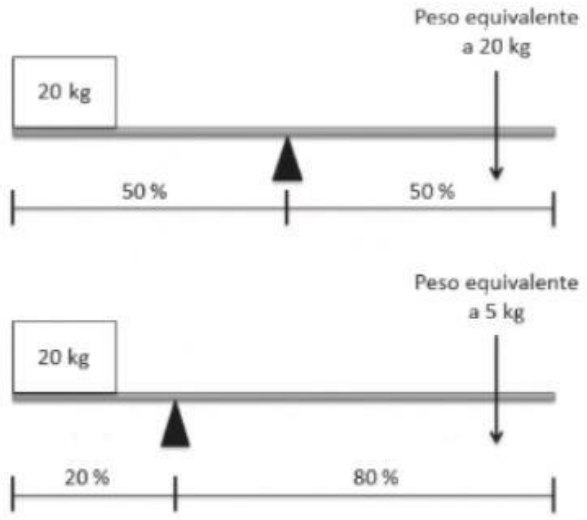
volumen está relacionado con el tamaño con una potencia cúbica (tres dimensiones del espacio), mientras que la superficie solo al cuadrado (es una superficie, son dos dimensiones). Esta es la razón por la que a una mosca gigante se le partirían las patas, un humano gigante apenas podría pensar, por la que al tomar un mismo diseño de avión y triplicar su tamaño no conseguiríamos hacerlo volar o por la que un mamífero pequeño en el agua muere en pocos minutos. Fíjate en esta última: el calor se genera por reacciones químicas en el volumen del cuerpo, mientras que este se disipa o pierde por contacto de su superficie con el ambiente: para retener calor conviene tener un cuerpo grande, de mucho volumen, y si no podemos aumentar el volumen..., disminuir la superficie. ¿No es esto justo lo que haces cuando tienes frío? Cuando tenemos frío nos encogemos y tiritamos. Al hacernos «bola», reducimos la superficie de contacto con el aire y, por lo tanto, la disipación de calor en nuestro cuerpo. Tiritar sirve para inducir reacciones químicas en tu cuerpo para liberar calor, vamos, quemar grasa. Como ves, reacciones inconscientes como las que seguiría el mejor de los físicos, sin ir más lejos... Galileo mismo. Sí, él fue el primero en observar esta ley del cuadrado-cubo. Y tú que ya la sabías, y sin estudiar física.

Tampoco nos damos cuenta, pero calculamos distancias con nuestra vista de un modo muy preciso gracias a la triangulación... y la trigonometría. Tu cerebro lo realiza todo el tiempo y luego tú suspendiendo exámenes de matemáticas. Seguramente has notado que tenemos dos ojos, y no es casualidad. De hecho, taparte uno y caminar por casa (no lo hagas por la calle) te sirve para darte cuenta de la importancia que tiene: sin uno de tus ojos es mucho más difícil percibir la sensación de profundidad. Vamos a hacer un pequeño experimento para que veas cómo funciona: extiende un brazo y levanta el pulgar, como dando un *like*, con algo de fondo que te sirva de referencia; ahora ve cerrando el ojo derecho y el izquierdo sucesivamente..., uno tras otro. ¿Notas cómo parece que el dedo se mueve? Esto es debido a que cada ojo tiene una perspectiva diferente: tomamos una imagen del dedo desde dos ángulos. Ahora repite el mismo experimento del dedo con un objeto muy lejano y con otro muy cercano. ¿Ves alguna diferencia? El cercano «se mueve» más, la diferencia de perspectiva entre los ojos es más notoria, hay mayor ángulo. Es esta la técnica que usa tu cerebro para calcular distancias a los objetos: toma dos fotos, desde los dos ojos y, si algo difiere mucho en su localización en ambos ojos, está cerca; si es similar, está lejos. Fácil..., al menos para tu cerebro, que lo hace de forma automática. Gracias, cerebro. Es así como se calcula la distancia a las estrellas, a través de un método conocido como paralaje y consiste en usar dos «ojos» distantes: dos telescopios en distintos puntos de la Tierra que observan un planeta a la vez. Ver cómo varía la posición de ese planeta respecto a las estrellas lejanas que sirven de fondo según miras desde uno u otro telescopio sirvió históricamente para calcular la distancia a Marte, y con ello a todos los planetas del sistema solar, tal como lo hizo por primera vez, de forma muy precisa, el italiano Giovanni Cassini. Y es así como funciona el cine 3D, dos cámaras grabando desde diferente perspectiva y que llegan de forma diferenciada a cada uno de tus ojos..., triangulación pura.

«Dame un punto de apoyo y moveré el mundo», es la famosa frase que refiere al principio de palanca y se atribuye al gran científico de la era clásica, Arquímedes. Una palanca es una barra larga con un punto de apoyo y sirve para levantar grandes pesos. Colocamos el punto de apoyo cerca del objeto que queremos izar de modo que la mayor parte de la barra (brazo de palanca) quede al otro lado. Hacemos fuerza en el extremo de la palanca para que el objeto suba, tan simple como eso. Cuanto más cerca esté el punto de apoyo

del objeto y más larga sea la barra, más peso podremos levantar siguiendo este principio. Un principio que se conoce desde que el hombre es hombre. Y lo usamos día tras día, ¿no me crees? Pues cuando abres una botella de cerveza, por ejemplo, lo estás aplicando. O en remo. O en una versión distinta, cuando abres una puerta. ¿Y en qué consiste? El principio de palanca se basa en la física de los momentos de fuerza. Resumiendo mucho: para una misma fuerza, el momento de fuerza es mayor cuanto más lejos esté del punto de apoyo (lo que se conoce como brazo). Si colocamos una caja de 20 kilogramos en un lado de una barra de un metro y fijamos el punto de apoyo en la mitad de la barra, en el otro extremo tendremos que hacer una fuerza equivalente al peso de esa caja para vencerla y levantarla. Habrá que hacer que ambos momentos de la fuerza sean iguales. Pero según acercamos el punto de apoyo a la caja, el momento de la fuerza que ejerce la caja va disminuyendo (menor brazo) y el brazo sobre el que aplicamos la fuerza va aumentando, por lo que tendremos que hacer cada vez menos fuerza para vencer la resistencia de la caja.

FIGURA 5.1



Así, una palanca sirve para amplificar una fuerza: para una misma fuerza, cuanto mayor brazo de palanca, mayor es la fuerza efectiva en el otro extremo. Eso lo usamos, como dijimos, para abrir una botella de chapa o a diario para abrir las puertas. ¿Te has fijado en que los pomos siempre están en el lado opuesto al lado de la bisagra? ¿Se te ha ocurrido intentar alguna vez abrir una puerta empujándola cerca de la bisagra? Cuanto más lejos de la bisagra se aplique la fuerza, mayor será su momento y menos costará abrirla. Pura física.

Algo relacionado con lo anterior también hacemos constantemente para mantener el equilibrio. ¿Qué haces si quieres evitar caer si alguien te empuja? Fácil, abrir bien las piernas y flexionar. Al abrir las piernas aumentas la superficie que sirve de apoyo, lo que dificulta el giro. Al flexionar estás bajando tu centro de masas, lo que te da más equilibrio. De nuevo... momento de fuerza, cuanto menor es el brazo de palanca, menor es el momento, y por eso flexionar las piernas nos da más estabilidad. Seguro que visualmente

distingues rápidamente cuál de las dos figuras de arriba es más estable, con la misma área, el mismo volumen y la misma masa..., ¿ya elegiste cuál?

Acertaste porque lo has probado muchas veces, has repetido la experiencia y has reconocido un patrón en forma de ley: los objetos con el centro de masas más bajo tienen mayor estabilidad. Bravo, amigo físico.

FIGURA 5.2

Similar, pero no tan del día a día, es lo que hacen los patinadores, bailarines y el resto de personas que aman girar rápido. El momento angular (de giro) es de nuevo una relación entre el «brazo» de giro y la velocidad de giro. Cuando giramos, al encogernos estamos disminuyendo el brazo de giro, por lo que aumenta en proporción la velocidad a la que giramos. Puedes verlo tú mismo, en cualquier ejercicio de una patinadora, cómo aumenta y disminuye su velocidad de giro con tan solo encoger o estirar los brazos. Es pura conservación del momento angular, aunque igual él o ella no lo llamen así, lo harán por instinto. Es uno de los principios más importantes para entender la dinámica estelar. Al comprimir el gas, las estrellas se «encogen» y giran más rápido. Los púlsares, estrellas de neutrones que pueden tener la masa de una gran estrella comprimida en un volumen de unos pocos kilómetros de radio, pueden llegar a dar varios cientos de vueltas sobre sí mismos por segundo. Y esto haciendo lo mismo que hace, por instinto, un patinador.

Las leyes de Newton son pura intuición, aunque desde luego la forma en que las formuló no está al alcance de cualquiera. La ley de inercia, su primera ley, nos dice que todo cuerpo tiende a mantener su estado de movimiento (o reposo). Creo que instintivamente todos reaccionamos de forma adecuada cuando un coche frena de golpe, haciendo lo posible para no salir disparados hacia delante. Es un acto instintivo reflejo de una ley física: nuestro cuerpo sale disparado porque quiere mantener su estado de movimiento. Pura inercia. La segunda ley de Newton, quizá la más famosa, nos indica que para acelerar un cuerpo se requiere una fuerza, y que esta tendrá que ser mayor cuanta más masa tenga un cuerpo. Vamos, que es más costoso mover un piano que una silla. Creo que esto es algo que también tenemos profundamente integrado en nuestro código. Finalmente, la ley de acción y reacción. A toda acción le sigue una reacción de igual magnitud y sentido opuesto, dice esta ley. Esta la usamos continuamente, de nuevo, sin darnos cuenta. Estás en la silla con ruedas del despacho y quieres moverte por el cuarto, empujas contra la mesa en sentido contrario. Quieres saltar, tus músculos se contraen para ejercer fuerza contra el suelo. Estás nadando en una piscina o en una barca en un estanque y quieres moverte, empujas agua en el sentido contrario. Acción, reacción. Constantemente. El mismo principio que se usa, por ejemplo, para propulsar cohetes: gases que se expulsan por una tobera en un sentido y en el sentido contrario nuestro astronauta, que sale disparado hacia el espacio a toda velocidad.

La forma como entendemos el espacio y el movimiento en el espacio también es instintiva y tiene su fundamento físico en lo que se conoce como principio

de relatividad de Galileo. Según este principio, entendemos las distancias como relativas a quien las mide. Además tenemos como natural algo que más tarde desafiaría Einstein, la regla de suma de velocidades. Si una escalera mecánica se mueve a 5 km/h y tú caminas a 3 km/h, si caminas mientras subes por la escalera mecánica, te estarás desplazando a 8 km/h. Pura relatividad de Galileo y algo tan intuitivo como es el hecho de que cuando tienes prisa subes por la escalera mecánica a toda velocidad. Nos parece tan natural que las velocidades se sumen...

No hace falta ser catedrático en física para entender el concepto de temperatura, al menos cuando nos referimos a «andar por casa». Entendemos que el calor fluye de lo caliente a lo frío, nos acercamos a algo caliente esperando que nos dé calor cuando sentimos frío; nos damos un baño intentando refrescarnos cuando hace mucho calor. Manejamos el concepto macroscópico de temperatura como dignos físicos sin saber siquiera que existe un campo de la física, la termodinámica, dedicado a ello. Pero es de nuevo nuestro lado científico que una y otra vez hace leyes tras observar repetidamente el mismo comportamiento: el hielo se derrite en un vaso de agua, el agua hierve en el fuego, para secar una camiseta la ponemos al sol... Sabemos que uno de los mecanismos de transmisión de calor es por contacto, por eso nos abrigamos cuando hace frío. El abrigo aísla tu cuerpo del aire frío disminuyendo la pérdida de calor por conducción. Entendemos que el color negro representa absorción total de luz, por eso evitamos utilizar ese color en días calurosos, pues aumenta la sensación de sofoco. Tapamos la olla cuando queremos calentar el agua para que el calor no se pierda rápidamente por convección, ya que el aire caliente es menos denso que el frío, y por eso tiende a ascender. Entendemos los conceptos de conducción de calor y capacidad calórica que hace que los líquidos, sólidos, gases, metales... no tengan la misma respuesta ante un contacto térmico: sentimos el metal frío en la silla, evitamos poner la mano sobre la chapa de un coche en un día de mucho sol y sabemos que por mucho calor que haga el agua siempre estará más fresca, y la usamos para aliviar el calor. Y sin entender el concepto de equilibrio térmico somos capaces de razonar que si vamos a secar la ropa es mejor hacerlo en un lugar donde sople el viento. Como ves, algunas veces el mejor laboratorio es la calle.

Y hay más, como la presión, que definimos como fuerza por unidad de superficie. Por eso cortamos con cuchillos y no con cucharas, usamos superficies afiladas para cortar o pinchos muy finos para clavar. Aunque la fuerza sea la misma, la presión es mucho mayor si la superficie se hace más pequeña. Los que fabrican agujas lo saben y quienes las usan también: menor superficie, mayor presión y más capacidad de penetración. Es también el secreto de los faquires: reparten su peso por muchos clavos, lo cual reduce la presión y les permite tumbarse en su cama de pinchos sin resultar heridos. Sobre presión y velocidad, en este caso de fluidos, también manejamos el efecto Venturi y el principio de Bernoulli en la piscina. Cuando queremos que salga agua a mayor velocidad reducimos la sección de la manguera tapándola parcialmente con el dedo. Disminuye la presión, aumenta la velocidad y se mantiene una energía constante: un principio físico. Y tú sin saberlo.

Y sin duda hay mucha física en el deporte. En el tenis los jugadores golpean la pelota en un *swing* casi diría que antinatural para hacer que la pelota salga despedida de la raqueta dando vueltas a gran velocidad. Cuanto más rápido salga, mejor. Roger Federer o especialmente Rafael Nadal se esfuerzan en particular en este punto, y esto es pura dinámica de fluidos. Es el efecto Magnus: la presión en este caso es mayor en la parte superior de la bola y menor en la inferior, lo que provoca que la pelota se deforme ligeramente

(forma aplatanada) y hace que caiga más rápido, por lo que se puede golpear con más violencia la pelota sin miedo a que se te vaya de fondo. Además, al contactar con el suelo, debido al giro de la pelota, esta saldrá despedida hacia delante, por rozamiento con el suelo. El efecto total es que puedes imprimir más energía a la pelota sin que su pique salga del campo rival. Lo opuesto ocurre en el golpeo cortado, en el que la pelota gira en el sentido contrario. En estas condiciones, la pelota «flota» un poco más en el aire y tarda más en caer. El bote con la superficie «frena» la bola y hace que no pique tanto. Igual Nadal lo sabe por teoría, pero me inclino a pensar que más bien es por experiencia. Los futbolistas también usan ese mismo efecto, el efecto Magnus, pero de otra forma. Cuando un jugador lanza una falta, golpea la pelota de manera que gire sobre su polo norte-sur (un eje vertical). De esta manera, la presión en un lado es mayor que en el otro (imagen), lo que provoca una fuerza lateral. Si has visto el gol de falta de Roberto Carlos con Brasil a Francia (si no lo has visto ya puedes ir corriendo a YouTube a buscarlo), te darás cuenta del poder que tiene este efecto. La curva que describe el balón es causada por la diferencia de presiones en ambos lados de un cuerpo esférico que gira dentro de un fluido, pura física de fluidos. También produce que el balón se deforme, aunque igual en condiciones normales no tanto como en los dibujos de Oliver y Benji.

FIGURA 5.3

Y hay más: la técnica Fosbury de salto de altura es física; las parábolas en el baloncesto; cómo se acuestan los pilotos de motos en las curvas es física; la natación, la aerodinámica de los ciclistas, coches de carreras y deportes de alta velocidad. Y hay más: todos los lanzadores de martillo, de disco, de jabalina..., intuitivamente lo saben, sin necesidad de hacer los cálculos, pero la física nos dice que para lanzar un objeto que llegue lo más lejos posible hay que hacerlo a un ángulo de 45 grados: un compromiso entre que avance con mucha velocidad en la horizontal y que se aleje del suelo lo máximo en la vertical.

Hay física en cada movimiento que hacemos, cada acción que ejecutamos, cada actividad consciente. Y en todas ellas estamos actuando como buenos físicos, aunque muchas veces ni nos demos cuenta. Muchas de estas acciones son conscientes y responden a un aprendizaje basado en la prueba y el error, una actitud, dicho sea de paso, muy científica. Otras tantas lo hacemos de forma inconsciente, como seres físicos que se han adaptado a su entorno y tienen esas respuestas bien clavadas como parte de su instinto de supervivencia.

Nacemos científicos, crecemos científicos y algunos, además, desarrollan

esas habilidades innatas que los hacen pasar a un segundo nivel. Un pedestal un poquito superior desde donde se ve el mundo de una forma muy diferente. Cuando no solamente haces las cosas porque el instinto te dice que así deben ser, sino porque razonadamente así lo consideras, cuando ves en tu entorno la acción de diferentes leyes físicas en consonancia para producir todos los efectos que observas, en ese momento estás viendo el mundo como un físico de nivel 2. ¿Quieres saber en qué consiste?

6.
Inteligencia formada

«La naturaleza está escrita en el lenguaje de las matemáticas», decía Galileo Galilei. Y es algo que nos parece natural, pero en realidad si lo piensas detenidamente no debería ser nada obvio. ¿Por qué tiene que haber reglas fijas que se puedan escribir en forma de proporciones o equivalencias? Bien podríamos imaginar un mundo completamente distinto..., pero no es así. Vivimos en un universo matemático que podemos describir, medir y cuantificar con operaciones, con reglas que se pueden traducir en lenguaje matemático y con las que podemos hacer predicciones razonadas.

De modo que podemos sumar a nuestra propia intuición física una capa de racionalidad, añadiendo una base de conocimientos que nos permiten entender mejor el porqué de los fenómenos y las consecuencias de nuestras acciones. Nos permiten primero entender y luego predecir. Nos dan poder sobre el futuro, como adivinos formados, con estudios, y nos hacen un poco más superhombres.

En definitiva, son reglas que muchas veces decoramos con el pomposo título de «leyes» y que funcionan como una herramienta. Si quieres apretar un tornillo, usas un destornillador, para una tuerca tomas una llave inglesa, para un clavo mejor tomar un martillo. Hay veces que el mueble es tan complicado que necesitarás varias de estas herramientas para montarlo. Pero es una suerte que las tengas a mano, sin ellas sería imposible montar el mueble. Sí, ya te veo imaginando uno de esos muebles de IKEA..., ¿qué sería de nosotros con todas esas tablas sin buenas herramientas y un buen libro de instrucciones?

Las herramientas de un físico son las reglas que sigue el universo: principios, leyes, efectos... Forman un kit de herramientas en el que cada una es útil para un determinado caso: en función del fenómeno bien podría serte

necesario utilizar la ley de conservación de la energía, el principio de exclusión de Pauli, el efecto Meissner... El libro de instrucciones es eso que te hace entender qué herramienta usar en cada caso, ¿verdad? Pues ese libro de instrucciones son tus propios conocimientos y los de científicos que antes que tú pensaron en las mismas cuestiones. Esta habilidad te la da tu experiencia y muchas veces... cierta intuición que se desprende de esta.

Todo esto es lo que tiene en su coco un físico de nivel 2. Y vaya si tiene superpoder este físico, no solo tiene instrumentos con los que ampliar sus cinco sentidos, sino que también tiene capacidad de ver el futuro con su kit de herramientas. Un kit que sigue ampliándose según se descubren nuevas reglas, nuevos elementos..., un kit que lleva más de dos mil años sirviendo a científicos a la vez que mejorando sus propias capacidades. Nuestro kit actual es el producto de trabajos de las mentes más brillantes que han habitado este planeta, ha ido evolucionando, ampliándose y perfeccionándose con generaciones y generaciones de físicos, con cada vez más precisos e ingeniosos experimentos, con nuevas e ingeniosas ideas. Partimos de una caja de herramientas de madera, con utensilios propios de la Edad de Piedra, que fue perfeccionada de la mano de grandes científicos como Galileo, Newton, Faraday, Einstein o Fermi hasta convertirla en lo que es hoy, un moderno taller digno del mismísimo Iron Man. ¿Y qué es lo que tiene este taller? Es lo que vamos a ver a continuación, los utensilios de un físico de nivel 2 para entender y explorar el mundo que lo rodea.

Generalmente se considera como los primeros grandes exponentes de la ciencia moderna, la ciencia basada en la experimentación y el método científico, a Galileo Galilei y a Isaac Newton. De ambos parten las leyes del movimiento, la parte de la física que hoy conocemos como cinemática y dinámica y que estudia el movimiento de los cuerpos en el espacio y ante la acción de diferentes fuerzas. De aquí surge el conocido como principio de relatividad de Galileo: el tiempo es absoluto y el espacio relativo a quien lo mide (o al sistema de referencia); al movernos, la posición de los objetos cambia con respecto al observador, mientras que el tiempo es indiferente a los cambios de punto de vista. De ello se deduce el principio de adición de velocidades: si vas en un tren a 100 km/h y caminas por el tren a 5 km/h estarás en total viajando a 105 km/h. Algo que parece razonable. Con la cinemática podemos estudiar el movimiento de los cuerpos en el espacio, cómo cambia su posición según su velocidad inicial y su aceleración. La dinámica amplía la cinemática teniendo en cuenta los agentes externos que modifican el estado de movimiento de un cuerpo. Las diferentes fuerzas que actúan sobre un cuerpo producen un cambio en su estado de movimiento. Lo cual nos lleva a las muy celebradas tres leyes de Newton: la ley de inercia, su famoso $F = ma$, y finalmente la ley de acción y reacción.

La ley de inercia nos dice que un cuerpo permanece en reposo o movimiento constante a menos que se le aplique una fuerza externa. Es decir, tendemos a mantener nuestro estado de movimiento, sea el que sea. Parece una tontería de ley, pero tiene grandísimas implicaciones, además de venir de un titánico trabajo de abstracción. Piénsalo: en nuestra experiencia cotidiana cualquier objeto que ponemos en movimiento acaba por detenerse...; entender que esto no es debido a algo propio del movimiento, sino a acciones externas como son el rozamiento con el suelo o con el aire, es un gran paso. A falta de estas acciones, en el vacío, por ejemplo, una pelota en movimiento nunca se detendría. Pero obviamente Newton no contaba con una cámara de vacío... Esta ley es la que hace que cuando el bus se frene tú te vayas de boca o cuando el coche acelere te pegues contra el respaldo del asiento. Es... inercia. La segunda ley de Newton nos dice que la suma vectorial de todas las fuerzas externas es igual a la masa por la aceleración. Esto nos da mucha información; quiere decir que como producto de las acciones externas sobre un cuerpo este

se acelera, y lo hará de mayor manera cuanto menor sea su masa. Es decir, para una misma fuerza, se acelera más un microondas que un piano; llamamos a esta masa la masa inercial, que se puede ver, y aquí pon muchas comillas, como un «impedimento» al cambio de movimiento. Como producto de estas acciones externas, el cuerpo comienza a moverse de forma acelerada. Y finalmente la tercera ley de Newton, la ley de acción y reacción, que nos dice que a toda acción sobre un cuerpo le sigue una reacción, una fuerza de la misma magnitud y de sentido contrario. Es así como saltamos, nos impulsamos para avanzar o la culpable del retroceso cuando en las pelis disparan una bazuca... Obviamente, es una ley que está por todos los sitios: siempre que hay una acción, una fuerza, hay una reacción. En cada rincón del universo es así..., al menos que sepamos. También esto ocurre en el día a día, tus acciones dan lugar a reacciones de los demás. Beso, cachetón. Nos pasa mucho, a los frikis.

Son tres leyes omnipresentes, fundamentales, son herramientas básicas que aparecen siempre que haya una fuerza en un sistema. Esto es la llave inglesa de nuestro kit de herramientas.

Si Newton es considerado el científico más grande de todos los tiempos es por algo. Con tan solo veinticinco años dio con la ley de la gravitación universal:

$$F = GmM/r^2$$

Con ella que se puede cuantificar la magnitud de atracción entre dos masas, lo que llamamos la fuerza de la gravedad. Esta ley establece que esta fuerza es más intensa cuanto más masivos son los cuerpos y cuanto más cerca están. Es una fuerza de alcance infinito (tu cuerpo está atrayendo al resto de los cuerpos del universo, por muy lejos que estén), aunque su intensidad cae muy rápidamente con la distancia (r^2). Así que al menos, desde el punto de vista gravitatorio, tu cuerpo es muy atractivo, y más cuanto más masivo sea (y más cerca estén de ti). A la masa de esta ley se la conoce con el nombre de masa gravitatoria, y es una cuestión muy bonita del universo que sea la misma que la masa inercial que antes definimos. ¡Qué alivio! Con esta ley podemos cuantificar la atracción entre dos cuerpos con masa. No solo eso, Newton fue la primera persona en darse cuenta de que la fuerza que hace que una manzana se caiga de un árbol es la misma que la que hace que la Luna gire alrededor de la Tierra. ¿No es increíble? A este tipo de avance se le llama unificación: la capacidad de unir dos fenómenos aparentemente distintos en un mismo marco teórico, en este caso, la fuerza de la gravedad. Ahora el baile de los planetas alrededor del Sol dejaba de ser un misterio. Es un movimiento causado por la atracción gravitatoria de los cuerpos y su inercia del movimiento, lo que hace que sigan preciosas y eternas órbitas elípticas en el vacío. Por lo que la ley de la gravitación de Newton absorbió las tres leyes de Kepler: estas tres leyes se pueden deducir fácilmente a partir de la ley de Newton, lo que le da un carácter más general. De repente, gracias a esta «simple» ley, el ser humano se sintió todopoderoso. Con este kit de reglas era capaz de adelantarse al futuro, fue capaz de predecir exitosamente eclipses solares, el paso de los cometas (como el cometa Halley, científico que usó las leyes de Newton para predecir el regreso de este cometa), incluso de nuevos planetas: Neptuno se descubrió por ciertas anomalías en las órbitas de sus planetas vecinos, y su posición fue predicha usando la teoría de Newton. Con las leyes de Newton parecía que el universo abría sus misterios ante nuestros ojos. Se comenzaban a desvelar los secretos de la sinfonía del universo.

Pues sí, porque con esto ya podemos hacer virguerías. No solo para entender el orden cósmico, sino para todo tipo de aplicaciones. Con estas simples leyes se lanza un cohete a la Luna o se planea el viaje de una sonda a

Saturno; con ellas se programa el lanzamiento de un misil, se entiende que un avión vuele, los arquitectos diseñan casas y edificios, los ingenieros mecánicos la maquinaría industrial..., como puedes ver, es algo omnipresente en nuestras vidas. Inercia, fuerza y acción-reacción. A tatuártelo en la parte del cuerpo que prefieras.

Con las leyes de Newton somos capaces de entender el movimiento de los cuerpos en el mundo macroscópico, a nuestra escala, y somos capaces de realizar precisas predicciones sobre mil fenómenos. Pero el mundo es, por suerte, más complejo que todo eso. Desde la Antigüedad, por medio de Tales de Mileto, en torno al año 600 a. C., ya se conocía la existencia de otro tipo de fenómenos, de carácter distinto a los causados por la gravedad. Se trataba de ciertas piedras de ámbar que al frotarlas parecían atraer visiblemente pequeños objetos cercanos, y otras piedras en la isla de Magnesia que también respondían de forma diferente al resto de los cuerpos, atrayéndose o repeliéndose. De la palabra griega para ámbar, *elektrum*, surge una nueva fuerza, la eléctrica, y los fenómenos asociados a esta. De la isla de Magnesia viene el nombre de otra más: el magnetismo.

Hoy sabemos que electricidad y magnetismo son fuerzas relativas a partículas con carga eléctrica. Como la materia es generalmente neutra (está formada por igual cantidad de carga positiva que negativa, por lo que es, a grandes escalas, neutra), estos efectos no se aprecian en la mayor parte de los fenómenos naturales. Y a pesar de estar oculta tras esa cancelación (positivo con negativo da neutro), en el interior de los cuerpos es una fuerza de gran intensidad, muchísimo mayor que la de la gravedad. Por eso los fenómenos eléctricos, aunque se den en cuerpos pequeños, tienen gran relevancia.

Los fenómenos de la electricidad y el magnetismo permanecieron encerrados y ocultos dentro de la materia neutra, por lo que hay que esperar al siglo XVIII para ver auténticos desarrollos científicos de la materia, gracias a aportaciones de grandes físicos como Gilbert, Leyden, Franklin, Volta, Ampere o Coulomb. Lo cual culminaría con una comprensión completa de estos fenómenos gracias a las leyes de Ampere, Gauss y Faraday, y con la recopilación en forma de cuatro leyes que reciben el nombre de ecuaciones de Maxwell. Este compendio, las leyes de Maxwell, se podría decir que cierra todo el conocimiento que tenemos sobre electricidad y magnetismo y eleva estas dos fuerzas a un nuevo nivel con su unificación en la forma de una única fuerza: el electromagnetismo. Pero creo que esto requiere de una explicación detenida.

La ley de Gauss para la electricidad establece que las cargas eléctricas son la fuente del campo eléctrico (la electricidad, vamos). La fuerza eléctrica surge como una acción que nace en las cargas eléctricas. La ley de Gauss para el magnetismo establece que el campo magnético no tiene fuentes, son líneas cerradas que van del polo norte al sur de un imán (no existen los monopolos magnéticos). La ley de Ampere establece que una corriente por un hilo genera un campo magnético a su alrededor, mientras que la ley de inducción de Faraday indica que un campo magnético variable genera una corriente en un conductor (inducción). Como ves, hay cierta simetría en estas cuatro leyes con respecto a la electricidad y el magnetismo. Es esta simetría la que explotó Maxwell para mostrar que electricidad y magnetismo no son sino dos fenómenos diferentes de un mismo agente, dos caras de una misma moneda, el electromagnetismo. Ambos son fenómenos producidos por una misma realidad, la carga eléctrica.

Como ya hemos visto, a este tipo de avances se les llama unificación y son de los logros más celebrados en física, puesto que consiguen explicar realidades diferentes bajo un mismo marco teórico, lo cual es simplemente maravilloso. Y no solo eso, al tomar estas ecuaciones en conjunto, Maxwell vio que los efectos electromagnéticos daban lugar a la propagación de un

nuevo tipo de ondas, las ondas electromagnéticas, que para su sorpresa se propagaban exactamente a la velocidad de la luz. ¿Será la luz una onda electromagnética? Hemos visto en el capítulo dedicado a la vista que eso es así, por lo que el gran trabajo de Maxwell lleva a una nueva unificación: el electromagnetismo y la óptica. Ondas que posteriormente descubriría Hertz y que usaría Marconi para iniciar una nueva era en las comunicaciones.

Esto, junto con el anterior trabajo de Coulomb y el de Lorentz, parecía completar finalmente la comprensión de cualquier fenómeno relacionado con la electricidad y el magnetismo. Coulomb dio con una expresión para la fuerza de atracción o repulsión de dos cargas eléctricas. Es una fuerza de alcance infinito, como la gravedad, y en forma muy similar a esta:

$$F = Kqq/r^2$$

La fuerza es de atracción si las cargas son opuestas, de repulsión si son iguales. La ecuación de Lorentz reúne la ley de Coulomb junto con la fuerza magnética. Una partícula cargada en un campo magnético sufre la acción de una fuerza que es:

$$F = q(E+vXB)$$

En cristiano, es de magnitud igual al producto de la carga por la velocidad de la partícula y la intensidad del campo magnético. Y tiene sentido perpendicular al plano que forman la velocidad de la partícula y el campo magnético presente. Se entienda mejor o peor esta parte, lo importante es que con los avances dados por las ecuaciones de Maxwell y de las fuerzas eléctrica y magnética ya tenemos el kit de herramientas para tratar cualquier fenómeno que involucre cargas en movimiento, que será una combinación de estas ecuaciones para la electricidad y el magnetismo, junto con las leyes de Newton para el movimiento. Fácil.

Esto es un logro tan grande que uno no necesita pomposas palabras para remarcarlo. Solo tienes que encender la luz de tu cuarto, tu ordenador, la televisión, utilizar el móvil..., ¿te das cuenta de cómo ha cambiado el mundo desde que la electricidad y el magnetismo no tienen secretos para nosotros? La comprensión de los fenómenos electromagnéticos significó un pistoletazo de salida para una auténtica revolución, la que ha llegado a nuestros días. Industria, comunicaciones..., el mundo no volvería a ser como era gracias a los grandes avances de inventores y científicos que en todo el mundo fueron aplicando los principios de estas nuevas leyes. No exagero. El 50 % del PIB mundial está basado en alguno de los desarrollos teóricos e inventos de Michael Faraday sobre la electricidad. Sentó las bases de los generadores: transformadores de energía mecánica (movimiento) en corriente eléctrica. Son imanes que giran dentro de hilos conductores; al girar, el imán (el campo magnético) varía y se induce corriente en el conductor. Y de los motores eléctricos: el proceso inverso, conversión de energía eléctrica en mecánica, movimiento. Con ambos procesos podemos generar energía en una central y transmitirla como potencial eléctrico a casas e industrias, donde se puede convertir en energía mecánica, movimiento o luz. Modernizó las comunicaciones, con hilos, con desarrollos como el telégrafo o el teléfono, y sin hilos, dando lugar a las comunicaciones inalámbricas tan extendidas hoy en día. La electrónica y la computación son un reflejo de las posibilidades que nos ha ofrecido entender y dominar la fuerza electromagnética.

Fue tal el avance que se produjo en la comprensión de los fenómenos naturales allá hacia finales del siglo XIX gracias a la teoría electromagnética y la gravitatoria que los científicos de esa época comenzaban a pensar que la física ya estaba resuelta, un campo cerrado y acabado, tocaba hacer otra cosa. Los

profesores, como ya hemos comentado, recomendaban a sus alumnos que estudiaran algo diferente, pues parecía que en física no había futuro. Se sabía todo. Parece que el gran científico lord Kelvin fue uno de los que hizo una afirmación similar. Y más cuando no solo se avanzaba en la comprensión fundamental de la naturaleza, sino también de sus propiedades a escala macroscópica, te hablo de campos como la termodinámica, la dinámica de fluidos o la física de estado sólido. No son «fundamentales» en el sentido en que no se corresponden con ningún tipo de fenómeno fundamental que ocurra sobre la materia, no son leyes de la naturaleza, sino fenómenos emergentes, que surgen cuando se estudia la materia en conjunto. No son propiedades de los elementos de la naturaleza, sino comportamiento colectivo. Por ejemplo, la dinámica de fluidos estudia las propiedades de un gran número de moléculas cuando la materia está en estado líquido o gaseoso. Las propiedades que de ella se extraen no tiene sentido aplicarlas a una partícula o un grupo pequeño de estas, sino solo a su conjunto.

Solo por ser muy representativa y conocida me voy a centrar en el conocimiento que se extrae del primero de estos campos mencionados: la termodinámica. La termodinámica es la rama de la física que estudia los fenómenos relacionados con el calor, es decir, la transferencia de energía entre sistemas no aislados. ¡Sistemas! ¿Ven? La termodinámica se refiere al comportamiento de la materia a escala macroscópica. En su estudio surgen propiedades que no tienen sentido en el plano individual, como la temperatura o la entropía.

Al ser una rama que trata la interacción de muchos cuerpos, estos fenómenos se entienden por medio de probabilidades y promedios, es la mecánica estadística. De esta forma, los primitivos conceptos de temperatura y presión del siglo XVII han dejado paso a una moderna concepción de estas magnitudes, como el promedio estadístico del movimiento o la posición de las partículas. Así, por ejemplo, la presión la entendemos como la fuerza resultante del choque de las partículas individuales sobre una superficie. Pero empecemos por el más común de todos ellos, el concepto de temperatura. ¿Qué es la temperatura según la mecánica estadística?

La temperatura está asociada a la energía cinética (de movimiento) de las partículas de un cuerpo. Así, un cuerpo con una alta temperatura es un cuerpo en el que sus componentes vibran o se trasladan con alta energía. Lo contrario ocurre con un cuerpo a baja temperatura, en el que sus partículas vibran o, en general, se mueven más lentamente. De esta forma podemos entender fácilmente que exista una temperatura mínima: aquella temperatura para la cual todas las partículas del objeto cesan de moverse. Este es el cero absoluto, el 0 de la escala Kelvin, que se corresponde con aproximadamente −273 grados Celsius.

Denominamos calor a la transferencia de energía cinética entre las partículas de dos cuerpos en contacto. Al poner dos cuerpos a diferente temperatura en contacto, las partículas más energéticas ceden, por choques, parte de su energía a las menos energéticas, hasta llegar a un equilibrio en el que la energía promedio es igual en los dos cuerpos. Fíjate que esto no es nada extraño, es como cuando juegas al billar, una bola con mucha energía golpea a una quieta, como consecuencia, la de alta energía se frena y la que estaba parada se acelera. Intercambian energía por la colisión. Esto lo vemos día a día, es lo que pasa, por ejemplo, cuando un hielo se derrite en un vaso de agua. Las partículas a temperatura más alta en el agua líquida (en realidad, moléculas) transfieren por colisión energía a las partículas del bloque de hielo. Las de mayor temperatura pierden parte de esta en la colisión, con lo cual el agua se «enfría» (baja su temperatura). Por el contrario, las partículas del hielo ganan energía, por lo que pasan a estado líquido. La situación de equilibrio se

corresponde con el momento en el que ya no hay transferencia neta de energía entre las moléculas: la energía promedio en todo el vaso es igual. Así pues, puedes ver que el concepto de frío en termodinámica no existe: los cuerpos tienen energía térmica y la ceden en forma de calor, y fluye del cuerpo con más energía térmica (el que llamamos comúnmente caliente) al que tiene menos (el frío). Así que desde el punto de vista físico y termodinámico, el frío no existe, solo hablamos en términos de temperatura (alta o baja) o de calor (su flujo).

Otro término útil en termodinámica es el de entropía. Este es un concepto un poco más complicado de entender que el de temperatura, puesto que no es algo que sea tan apreciable en el día a día. En el plano divulgativo se suele asociar la entropía con el desorden: un sistema con alta entropía es un sistema de gran desorden, el de baja entropía es el ordenado. Pero vamos a intentar afinar un poco más, puesto que esta definición se queda un poco coja. Imagina que tomas un libro como este y separas las páginas, las despegas (qué dolor ver mi libro así). Ahora lanzas las páginas al aire y las recoges del suelo. ¿Crees que seguirán estando ordenadas perfectamente de la primera a la última? Es poco probable, ¿verdad? Es simple estadística: mientras que solo hay una ordenación correcta de las páginas, ordenaciones incorrectas hay muchísimas. No hay ninguna ley física que haga que salga desordenado de forma necesaria, es solo cuestión de probabilidad. Decimos que el caso ordenado tiene poca entropía (poca probabilidad) mientras que el caso desordenado tiene entropía alta (mucha probabilidad) y es solo porque el número de combinaciones posibles de ese caso es mayor. Esto hace que muchos procesos físicos, aunque en principio sean posibles, no se den. Vemos una mancha dispersarse en el agua, pero nunca el efecto inverso, concentrarse. Vemos un huevo romperse y nunca rehacerse, un hielo derretirse y nunca espontáneamente volver a estado sólido. Son configuraciones posibles pero improbables, de baja entropía. Como ya sabes, siempre es más fácil deshacer que hacer. Cosas de la entropía.

Con estas pocas definiciones y principios se constituyen las leyes de la termodinámica. En vez de referirme a ellas de manera formal, para evitar caer en tecnicismos, voy a hablar un poco de las implicaciones que tienen estas leyes. La ley cero de la termodinámica nos habla de los sistemas en equilibrio y queda muy bien ejemplificada por el hielo que se derrite en el vaso de agua. Dos cuerpos en contacto alcanzan un equilibrio térmico cuando sus temperaturas se igualan. La primera ley de la termodinámica es la ley de conservación de la energía, ya sabes, la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. Un sistema aislado puede realizar trabajo o generar calor, pero será a costa de reducir su energía interna, de forma que la energía antes y después sea la misma. La segunda ley de la termodinámica se refiere a la entropía y a cómo cualquier sistema aislado tiende a evolucionar a un estado de mayor entropía. La entropía siempre crece, y si decrece, será a expensas de otro sistema que esté creciendo más: la entropía total del universo siempre es mayor. Esto es lo que en lenguaje no técnico se describe como que el universo tiende a un estado de mayor desorden, en realidad, de entropía. Es esta ley, de hecho, la que nos permite distinguir pasado de futuro: el pasado es el momento de menor entropía con respecto al presente, el futuro es de entropía mayor. Y finalmente está la tercera ley de la termodinámica, que establece un mínimo de temperatura, el cero absoluto, al que nos podemos acercar, pero nunca alcanzar.

Con este conocimiento (leyes de Newton, leyes de Maxwell y termodinámica) los científicos de finales del siglo XIX se frotaban las manos. Parecía que con estas pocas leyes se podría explicar cualquier fenómeno de la naturaleza. Pero el final del siglo XIX y el siglo XX deparaban alguna sorpresa.

¿Vamos a por el nivel 3?

7.
Inteligencia extrasensorial

«Tengo la sospecha personal de que el universo no solo es más extraño de lo que suponemos, sino más extraño incluso de lo que somos capaces de suponer», lo dijo Werner Heisenberg, aproximadamente hace un siglo. «Daría todo lo que sé por la mitad de lo que ignoro», esto viene de Descartes, y eso mucho antes de que supiéramos que el universo es tan raro. Tiene muchísimo mérito. En ambos casos la situación es clara: entender el mundo en el que vivimos no parece cosa fácil. Y eso que a finales del siglo XIX se frotaban las manos con lo que ya estaban anunciando como el fin de la física. ¡Qué irónico!

Pues sí, porque lo que llegó a continuación nadie lo podía haber esperado, y eso que ya había indicaciones de que algo no encajaba. En concreto, cuatro cuestiones muy importantes. En primer lugar, las ecuaciones de Maxwell, en ciertos puntos, estaban en contradicción con las leyes de Newton. ¿Newton o Maxwell? Los dos a la vez no podía ser. También había cálculos que hacían a los físicos echarse las manos a la cabeza, es lo que se conoce hoy como la catástrofe del ultravioleta. Si las cuentas estaban bien y la teoría no fallaba, la radiación térmica de un cuerpo en equilibrio térmico y aislado debería ser infinita. ¿Cómo infinita? Pues sí, es lo que decían los cálculos. En tercer lugar, tenemos la estimación sobre la edad de la Tierra y el sistema solar, estas no cuadraban con las escalas de tiempo necesarias para que la evolución diera lugar a seres desarrollados como nosotros. En esa época se pensaba que el Sol brillaba liberando energía por contracción gravitatoria, así, el Sol se hacía más pequeño y emitía el exceso de energía como luz. Finalmente, la radiactividad, descubierta por Henri Becquerel en 1896. ¿Qué clase de energía estaban emitiendo los materiales radiactivos? ¿De dónde tomaba prestada esa energía? No lo tenían nada claro.

Fue tal el descalabro que se produjo en aquella época y tal la revolución que sucedió en física cuando se fue indagando sobre la raíz de estos problemas que a la física anterior a este momento (históricamente hablamos de principios del siglo XX) se la conoce como física clásica. Y con razón, los principios que van a surgir de esta revolución hicieron tambalearse muchos cimientos y nos han permitido adentrarnos un poco más en la comprensión del universo.

Pero, antes de avanzar, recapitulemos. En el nivel 1 de física tenemos un ser humano que maneja conceptos como espacio y tiempo, energía, materia, sin necesidad de estudiarlo, digamos que forma parte de lo que conocemos como instinto. En el nivel 2 nos encontramos un físico que ha recogido el conocimiento a través de sus sentidos y ha sido capaz de formular hipótesis y elaborar teorías que explican lo que ocurre y le permiten predecir lo que podría ocurrir. Su conocimiento está basado en la observación. Pues bien, en el nivel 3 damos un paso más, los sentidos ya no son suficientes. Es más, ¡podrían engañarnos! Vista, olfato, gusto, tacto y oído son órganos humanos, desarrollados por la evolución para servir a los propósitos humanos, perfectamente adaptados a nuestro entorno. Pero ¿a qué sabe un átomo? Parece una pregunta absurda, y lo es, pero sirve para ilustrar un punto muy importante: los órganos humanos no están preparados para percibir nada fuera de nuestro entorno físico, nuestro «espacio de fases». Y, lo que es peor aún, nuestro cerebro tampoco. La supervivencia humana ha dependido de ver guepardos a la distancia, de manejar piedras y palos, pero nunca de entender la naturaleza cuántica de un electrón. Y ahí es donde nuestro cerebro nos deja tirados, nuestro sentido común nos abandona. La física moderna, la del nivel 3, desafía el sentido común, pues se adentra en un dominio y unas escalas que no son propias del ser humano y, por lo tanto, carecemos de experiencias e instintos para enfrentarnos a ellas.

¿Y de dónde viene este desajuste? Es fácil. La cuestión es que la región en el «espacio de fases» en la que se encuentra el ser humano, en su día a día, es muy pequeña y poco significativa con respecto al total, al estado del resto de la materia en el universo. Nuestro tamaño, la velocidad a la que viajamos, la energía de los cuerpos en nuestro entorno..., la vida en la Tierra es muy simple y aburrida a la escala humana. Podríamos decir que vivimos a ciegas respecto al resto de los fenómenos del universo: no los conocemos y nuestro cerebro no está preparado para entenderlo. La velocidad a la que viaja un electrón en un átomo, la energía y la temperatura en el corazón de una estrella, la densidad de energía en el entorno de un agujero negro o el tamaño de un protón son tan ajenos a nosotros que solo con la razón podemos tocarlos, una razón que tiene que luchar contra el sentido común. El metro, el segundo, el kilogramo son unidades humanas, creadas por el ser humano y adaptadas a sus necesidades. Pero el universo tiene su propia escala, son las unidades naturales. Usando las constantes fundamentales del universo (la velocidad de la luz, la constante de Planck, la constante de la gravitación universal, la constante de Boltzmann y la constante del electromagnetismo, de Coulomb) se pueden construir unidades que llamamos naturales o de Planck, pues fue el primero en proponerlas allá por el fin del siglo XIX. Teniendo en cuenta que la velocidad de la luz es longitud entre tiempo, la constante de Planck es masa por longitud al cuadrado entre tiempo, y así sucesivamente, podemos obtener que:

Longitud en escala de Planck: sqrt(hG/c^3), 1,6 10-35 m
Masa en la escala de Planck: sqrt(hc/G), 2,18 10-8 kg
Tiempo en la escala de Planck: sqrt(hG/c^5), 5,4 10^{-44}
Energía de Planck: sqrt(hc^5/G), 1,96 10^9 J

Como ves, los «latidos» del Universo son muy distintos a los humanos: distancias mínimas, masas muy pequeñas en tiempos diminutos y a altísimas energías. Un segundo para el universo es una eternidad... Estas son las reglas del universo y por eso estamos tan lejos de entenderlas, porque están en otra región completamente diferente del espacio de fases. Experimentando con niveles de esta escala es como realmente podemos aprender más acerca del universo. Aunque nada garantiza que nuestro cerebro las pueda entender.

Y, lo entiendo, suena extraño, con un cerebro tan preparado y tan desarrollado..., pero no es suficiente. Mira, hagamos un experimento: piensa en un color que nunca hayas visto, ¿lo has conseguido? Un olor que nunca han experimentado, un sonido que jamás hayas oído... o probemos con algo diferente: piensa en un mundo de cuatro dimensiones espaciales. Bueno, mejor no lo hagas, va a estallarte el cerebro. Ya te habrás dado cuenta, a nuestro cerebro le cuesta muchísimo trabajar en una región en la que no se siente cómodo, fuera de nuestra experiencia inmediata. Una lástima, porque de esta manera, como decía Heisenberg y también como abríamos el capítulo: «Posiblemente el universo no solo sea más extraño de lo que suponemos, sino incluso de lo que podemos suponer». O como lo explicaba un gran divulgador, Michio Kaku, en su libro *Hiperespacio*, a través de una pequeña analogía: igual tenemos las mismas esperanzas de comprender el universo que tiene una carpa en un estanque de entender la composición química de las estrellas.

Así que vamos a explorar los dominios de lo desconocido, allí donde nuestros sentidos no alcanzan. ¿Qué es aquello que ocurrió a principios del siglo XX que revolucionó la física?

Relatividad

Ahora parece evidente, pero tuvo que aparecer un científico muy diferente al resto para dar con la clave. Y es evidente... porque no hay más que comparar las ecuaciones de Maxwell y las de Newton para ver que no encajan, que algo falla. Pero cuando estamos hablando del legado de Newton no es fácil encontrar un valiente que se atreva a ponerlo en duda. Era necesario el valor de un temerario, alguien que se atreviera a romper todo lo establecido, alguien capaz de desafiar a cualquier autoridad. Esa persona era Albert Einstein.

Quizá fue esa la clave de su éxito. Muchos otros científicos rozaron la gloria, como Poincaré o Lorentz. De hecho, la relatividad se sustenta en las transformaciones de Lorentz, que fue quien primero las derivó. Aunque no fue capaz de dar el paso de atacar la interpretación de Newton del movimiento. Pero ¿qué es lo que fallaba? ¿Y cómo resolvió el problema el joven Einstein?

Las leyes de Newton explican el movimiento cuando lanzas una piedra, las de Maxwell son relativas al desplazamiento de la luz. Las leyes de Newton cumplen con lo que se denomina la relatividad de Galileo: si tú vas en un tren y tiras una piedra, la velocidad de la piedra será igual a la velocidad del tren más la velocidad a la que lanzas la piedra. ¿Ocurre lo mismo con un rayo? Si yo enciendo una linterna en un tren, ¿la luz irá a la velocidad de la luz más la del tren? No hay más que mirar las ecuaciones de Maxwell para encontrar la respuesta: la luz siempre viaja a la velocidad de la luz. Jugando con las ecuaciones de Maxwell llegas a un principio de transformación en el que las velocidades no se suman directamente, algo muy distinto a la relatividad de Galileo, son las transformaciones de Lorentz, el corazón de la relatividad de Einstein. Parece ser que una piedra y un rayo de luz no se mueven igual... ¿o será que una de las dos leyes, las de Newton o las de Maxwell, no eran correctas?

Einstein no razonó directamente así, pero llegó a la misma conclusión: había que retocar las leyes de Newton. Einstein de joven se hizo una pregunta: ¿qué ocurre si vamos tan rápidos que conseguimos alcanzar a un rayo de luz? ¿Se vería quieto? La respuesta, usando las leyes de Maxwell, es que no, que un rayo de luz siempre va a la velocidad de la luz. Las transformaciones y los cambios que tuvo que hacer en la física es lo que hoy conocemos como la teoría de la relatividad especial.

La relatividad especial pivota sobre las transformaciones de Lorentz, aquellas que son compatibles con las leyes de Maxwell. Según estas transformaciones, no existe un tiempo absoluto, sino que el tiempo discurre de forma diferente según el observador. Esto hace que perdamos el concepto de simultaneidad: para mí dos cosas pueden suceder a la vez, mientras que para ti primero ha ocurrido una y luego la otra. También surge el concepto de dilatación temporal, lo que para mí puede ser un segundo, para ti puede ser una hora, aunque estemos hablando de lo mismo. Incluso de dilatación espacial, los tamaños son también relativos al observador. En la relatividad todo depende del punto de vista, todo, menos las leyes de la física.

La relatividad especial eleva el tiempo a la categoría de dimensión. No es algo fijo, inamovible, estático, una especie de reloj cósmico. El tiempo es una dimensión que se puede recorrer y es individual para cada uno de nosotros. Además, es una dimensión conectada con las tres espaciales, de modo que lo que ocurre en el espacio afecta al tiempo, y viceversa. Es por eso por lo que hoy se entremezclan en un solo ente: el espacio-tiempo. Minkowski, gran matemático y profesor de Einstein, declaró: «Desde hoy en adelante el espacio por sí solo, y el tiempo por sí solo, están destinados a desvanecerse en meras sombras, y únicamente algún tipo de unión entre ambos conservará realidad independiente». Vivimos en un mundo de cuatro dimensiones, tres espaciales y una temporal.

La ecuación $E = mc^2$ surge de la propia relatividad especial y sus consecuencias son enormes. Según esta relación, la masa es una forma de

energía muy concentrada. Esto permitió entender la liberación de energía en el Sol por procesos de fusión, así como su uso artificial, la creación de potentes bombas basadas en la transformación de la masa en energía a través de la fisión. La relatividad transformó nuestra concepción de la energía, el espacio y el tiempo.

¿Por qué se tardó tanto en dar con la relatividad especial? La principal razón, creo yo, es que es contraria a nuestra experiencia, a lo que llamamos sentido común. Y esto es porque los efectos de la relatividad especial solo se aprecian a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. ¿Recuerdas aquello del espacio de fases? La relatividad especial opera en una región de este espacio muy ajena para nuestros sentidos, por lo que nuestro sentido común no tiene integradas sus consecuencias. Así, los efectos de la relatividad especial son extraños para nosotros, todos percibimos que el tiempo pasa de igual manera para todos, nadie pondría en duda la simultaneidad de dos sucesos, como el pitido inicial de un árbitro y la primera patada a un balón. La segunda razón... ¿quién sino un loco se atrevería a poner en duda las leyes de Newton? Lo hizo Albert Einstein.

La validez de la relatividad especial se ha comprobado en múltiples ocasiones y parece fuera de toda duda. El GPS no funcionaría si no se tuviera en cuenta la dilatación temporal en los relojes de los satélites al viajar tan rápido orbitando la Tierra. O los muones que se generan en la atmósfera por impacto de rayos cósmicos jamás llegarían a la superficie, mientras que se detectan millones de ellos. Los muones están viajando a tu futuro, su tiempo se contrae al viajar a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, lo que hace que su tiempo pase más lentamente que el tuyo. La relatividad especial es una de las teorías científicas más bellas y con resultados que más atentan contra nuestra propia intuición. Hay que ser físico de nivel 3 para entenderla.

Pero Einstein era un tipo duro, no había sino acabado de formular su relatividad especial que se lanzó con un reto aún mayor, su relatividad general. La relatividad especial es una teoría del espacio, el tiempo y el movimiento en él SIN gravedad. Ahora tocaba incluirla, lo cual no se veía nada fácil. Planck, su amigo, le avisó: hacer algo así le pondría al nivel del mismísimo Newton. Einstein no se asustó y se puso manos a la obra. Tuvo una intuición genial, lo que se conoce hoy como principio de equivalencia y que él consideraría más tarde como la idea más feliz de su vida. Consiguió asociar movimiento acelerado con gravedad. ¿Te has fijado cómo cuando un coche acelera sientes una presión contra el respaldo del asiento? ¿Has notado que cuando un ascensor acelera para subir parece que pesas más? Son fuerzas de inercia, las de la primera ley de Newton, esa fuerza «ficticia» que surge de la tendencia de los cuerpos a mantener su estado de movimiento o reposo. Einstein razonó que estas dos fuerzas de inercia se parecen mucho a la gravedad. ¿Será que la gravedad es también una fuerza de inercia, una fuerza ficticia que aparece como oposición a un movimiento de inercia? Einstein conectó movimiento acelerado y gravedad, esa fue su clave. De hecho, ese es el principio de equivalencia con palabras de andar por casa. Como Einstein conocía el efecto de un movimiento acelerado sobre el espacio-tiempo, pudo inferir el efecto de la gravedad gracias a esta equivalencia.

En la relatividad general de Einstein la gravedad es percibida como el movimiento libre de un cuerpo en un espacio-tiempo curvo. La masa curva el espacio-tiempo y los cuerpos en esta región de influencia reaccionan a esta curvatura con un movimiento acelerado (el de caída). Lo que llamamos peso es la fuerza de desaceleración que sufre el cuerpo ante el impedimento a moverse en esta caída libre. Más fácil. Imagina una lona flexible pero tensa. Al situar una masa en el medio (una bola de bolos, por ejemplo), la lona cede, deformándose. Si ahora lanzamos canicas a la lona, estas ya no irán en línea recta, sino que se moverán hacia la depresión creada en la lona por la

presencia de la bola. La bola deforma el espacio y es el espacio deformado el que le dice a la canica cómo moverse. El espacio-tiempo en relatividad general es análogo a esa lona, solo que en tres dimensiones. El Sol por su masa distorsiona el espacio-tiempo. La Tierra siente esta distorsión, lo que la hace caer hacia el centro del Sol. El movimiento de rotación alrededor del Sol de la Tierra es producido por esa «fuerza» de caída hacia el Sol, la gravedad. Los cuerpos con masa distorsionan el espacio-tiempo, lo que tiene un efecto muy particular en la percepción del tiempo de un observador en entornos de gravedad intensa: su reloj se frena. Sí, el tiempo pasa más lento a nivel del mar que en una montaña. ¿Has visto *Interstellar*? Pura relatividad general.

La gravedad de Einstein fue comprobada poco después de publicarse con una «posdicción» (un efecto que la teoría de Newton no podía explicar sobre la órbita de Mercurio y que la relatividad general era capaz de justificar) y en 1919 gracias a una de sus predicciones sobre el efecto de la gravedad en la luz (durante un eclipse de Sol pudieron medir la curvatura de un rayo de luz al pasar cerca del Sol). Aunque quizá la confirmación más espectacular vino en 2016 con la detección de las ondas gravitacionales por el experimento LIGO, esas ondas generadas en la «lona» del espacio-tiempo. Puedes imaginar que la teoría de la relatividad general nos ofrece hoy la descripción más fiel que tenemos de la fuerza de la gravedad y su papel a escala cósmica. Con ella entendemos la formación de agujeros negros, los procesos estelares, la formación de galaxias, el origen del universo... La relatividad general abrió una nueva era en el estudio del universo con el nacimiento de la cosmología.

Un físico nivel 3 ve en la gravedad más allá de lo que sus sentidos perciben. Ve cómo el espacio que hay alrededor se pliega ante la acción de una masa, entiende su peso como una desaceleración de un movimiento de inercia hacia el centro de la Tierra, comprende la relación movimiento-espacio-masa.

Cuántica

La revolución que produjo en física la teoría de la relatividad solo es comparable a la que causó el otro monstruo de la física, la cuántica. Más o menos en paralelo, aunque de forma muy diferente, se desarrolló una nueva concepción del mundo, una nueva visión que iba a romper con todo lo establecido y dejar libros y libros de física obsoletos. La cuántica no fue el trabajo individual de un genio, sino una elaboración colectiva. Tampoco un desarrollo puntual en el tiempo, sino que se extiende incluso hasta la actualidad.

La cuántica surge ante la imposibilidad de los físicos de inicios del siglo XX de entender el comportamiento de la materia a escala atómica. Con el descubrimiento del electrón en 1897 por J. Thompson, comienza la exploración del mundo submicroscópico y la gran frustración de los físicos que se enfrentaban a este reto al sentir que no había forma de entenderlo. Los resultados que se obtenían no parecían encajar de ninguna manera con la física de la época y las conclusiones se mostraban contradictorias entre sí. Parecía un mundo donde dominaba el sinsentido. Había que crear unas reglas físicas desde cero adaptadas al mundo subatómico. Bienvenidos al mundo cuántico.

De nuevo la mecánica cuántica resulta chocante porque viola cualquier intuición que tengamos sobre la naturaleza. Y esta vez también el culpable es su dominio de aplicación: dado que trata con sistemas ínfimos, nuestros sentidos no tienen esa experiencia y, por ende, todo conocimiento que extraemos de este mundo resulta agresivo contra nuestros prejuicios. Para «entender» la mecánica cuántica hay que dejar de lado el sentido común y abrir la mente a ideas que desafían toda lógica. ¿Preparado?

La primera vez que se usó el término «cuanto» en un desarrollo científico

fue en 1900 en una publicación de Max Planck en Alemania. Un gran problema de la época es lo que se conocía como catástrofe del ultravioleta: según la teoría física clásica, un cuerpo negro (absorbe toda la energía) en equilibrio térmico debería emitir energía a cualquier frecuencia, dando una cantidad infinita de energía. ¿Infinita? Pues sí, eso no es posible. Algo fallaba en la teoría clásica. La solución que propuso Planck se basaba en considerar que la energía se emite en forma de paquetes discretos de energía, múltiplos de una cantidad constante, la constante de Planck. Los paquetes de mayor frecuencia requieren paquetes de mayor energía, por lo que hay una contribución de frecuencia máxima que se puede emitir. Con este truco la energía emitida ya no se hace infinita y los resultados cuadran perfectamente con los experimentos. Hemos salvado el problema, pero no dejaba de parecer un truco sin sentido. ¿La energía es discreta?

Pocos años después, en 1905, Einstein usa el concepto de paquete de energía para resolver otro problema abierto de la física: no había forma de entender los resultados de un experimento, el llamado efecto fotoeléctrico. En este experimento una placa de metal cargada es iluminada. La energía de la luz hace que algunos electrones adquieran la energía suficiente para dar el salto, se genera una corriente. Hasta aquí todo bien. El problema es que la energía de esos electrones no parecía depender de la intensidad de la luz, sino solo de su frecuencia. Einstein lo resuelve fácilmente: la luz envía energía en forma de paquetes, como había propuesto Planck. Estos paquetes tienen más energía cuanto mayor es su frecuencia, en múltiplos de una cantidad constante, la constante de Planck. Resuelto el misterio, pero... seguimos sin entender qué es lo que está pasando aquí.

Estos dos misterios, el de la catástrofe del ultravioleta y el efecto fotoeléctrico, fueron la antesala de la gran revolución cuántica. Eran soluciones desesperadas pero que iban en la dirección adecuada: romper con lo establecido buscando soluciones más allá de lo conocido. Pero no vamos a adelantarnos..., sigamos con el transcurso normal de la historia.

Einstein resuelve el efecto fotoeléctrico proponiendo que la luz es una partícula, pero... ¿no habíamos quedado en que era una onda? Pues sí, eso era lo que hasta ese momento se estudiaba en las universidades y escuelas en física. Estamos entrando en la naturaleza dual de la luz, lo que se conoce como dualidad onda-corpúsculo: la luz es una onda y es una partícula; en función del experimento que diseñemos tendremos que estudiarla usando sus propiedades de onda o de partícula. Esto tuvo un grandísimo efecto en las jóvenes mentes brillantes de la época, como es el caso de un estudiante de tesis, un noble francés, el duque Louis de Broglie. Su dualidad aplicada al electrón llamó la atención del mismísimo Einstein, quien apoyó su tesis: el electrón es una partícula, pero también es una onda, una onda de materia.

Pero ¿una onda de qué? Erwin Schrödinger propone una descripción ondulatoria de la materia para explicar los fenómenos atómicos con su ecuación de onda, la ecuación de Schrödinger. Según esta ecuación y su interpretación (la interpretación de Bohm), esta onda es una onda de probabilidad que marca la probabilidad de encontrar una partícula en un determinado lugar o estado. Su posición o estado evoluciona como una onda, se propaga como una onda, aunque luego, al medirlo, se manifiesta el cuerpo como una partícula puntual.

Simultáneamente, aunque de una manera muy distinta, Heisenberg desarrolla su mecánica matricial, que más tarde se consideraría una forma equivalente de tratar los sistemas cuánticos. Las consecuencias de estas dos descripciones de la materia, la de Schrödinger y la de Heisenberg, eran difíciles de predecir. Veamos.

En primer lugar, la naturaleza probabilística de la materia no encajaba con nada parecido hasta el momento. Las leyes de la física clásica hacían

predicciones concretas sobre hechos que se podían medir, las leyes cuánticas lo máximo que permitían era dar una probabilidad. Pasamos de poder predecir las cosas a depender de la aleatoriedad. Las cosas suceden por azar..., pero ¿quién tira ese dado? Al evolucionar los estados como ondas, esto permite que un mismo sistema esté en dos estados a la vez, o dos lugares a la vez. Por ejemplo, si lanzas un electrón sobre dos rendijas, el electrón, como una onda, pasará por las dos rendijas a la vez. Preguntar por cuál ha pasado no tiene sentido, el electrón es una onda y cubre todo el espacio. Esto ocurre con cualquier magnitud de una partícula: si un electrón pudiera ser rojo o azul, el electrón sería a la vez rojo y azul, los dos a la vez, y solo cuando fuéramos a medirlo tomaría un color determinado, y lo haría por puro azar, sería imposible de predecir.

La descripción matricial de Heisenberg escondía también sus propias paradojas, como el principio de incertidumbre de Heisenberg. Según este principio, por cuestiones puramente intrínsecas a la naturaleza de la materia, no se puede saber con precisión infinita la posición y la velocidad de una partícula. En general, esto ocurre con dos magnitudes cualesquiera que estén conjugadas, como la energía y el tiempo. Las implicaciones de este principio en la naturaleza son de gran alcance, como la generación espontánea de materia en el vacío o la energía del punto cero. El principio de incertidumbre es uno de los pilares de la mecánica cuántica.

Y todavía hay más, como el principio de exclusión de Pauli, según el cual dos partículas no pueden estar exactamente en el mismo estado, lo cual explica la ordenación de electrones en capas dentro de un átomo. O el efecto túnel, que permite a partículas atravesar paredes como si no existieran, algo sin lo que la fusión nuclear en las estrellas o la radiactividad no serían posibles. Y qué decir del entrelazamiento, una propiedad que conecta partículas aunque estén alejadas en el espacio por miles de kilómetros, y que permite que soñemos con el teletransporte, eso sí, en un futuro muy lejano.

La revolución cuántica permitió entender los misterios del mundo atómico, con grandísimos éxitos que hoy nos permiten comprender la formación de átomos y moléculas, la interacción de partículas y las propiedades de la materia. Sin embargo, a un alto precio, aceptando un mundo aleatorio donde manda el azar, jugando con unas reglas que no se parecen en nada a lo que vivimos diariamente y con una interpretación que hoy en día sigue abierta. No es de extrañar que sus propios padres renegaran de ella, como Einstein o Schrödinger, que lamentaron haber tenido algo que ver con la mecánica cuántica. O, como expresa Richard Feynman, uno de los científicos más brillantes del siglo XX: «Si usted piensa que entiende la mecánica cuántica..., entonces usted no entiende la mecánica cuántica». Algo muy típico que siente un físico de nivel 3.

Los efectos de la relatividad especial se hacen patentes en los dominios donde la velocidad de los cuerpos es cercana a la velocidad de la luz, la relatividad general en sistemas con mucha masa o energía, como estrellas de neutrones o agujeros negros, y la cuántica en sistemas pequeños, en la escala atómica o, más técnicamente, en sistemas en los que las acciones (energía por tiempo) son comparables con la constante de Planck. Todos ellos muy ajenos a nosotros, muy lejos de nuestro espacio de fases, nuestro mundo de nivel 1 y 2. Por suerte, un físico, además de con los sentidos, está equipado con un sistema que le permite razonar y llegar aún más lejos, donde los sentidos no alcanzan. La mente es nuestra arma más potente para comprender el mundo y a la vez nuestra mayor limitación. Parece contradictorio que sea la mente lo que nos lleve tan lejos, pero a la vez solo sea liberándonos de sus prejuicios que consigamos avanzar aún más. Al final todo parece apuntar a que la clave para la comprensión total de las leyes del universo se encuentra en un rincón donde nuestro cerebro se siente perdido, donde la lógica nos abandona, el

instinto nos engaña y el sentido común nos juega una mala pasada. O, como decía Werner Heisenberg: «Tengo la sospecha personal de que el universo no solo es más extraño de lo que suponemos, sino más extraño incluso de lo que somos capaces de suponer».

8.
Superinteligencia

¿Existirá un nivel 4? ¿Un tipo de razonamiento físico que desconocemos y que nos lleve a la «verdad» sobre el universo? Igual una superinteligencia es capaz de entender el cosmos de una forma que hoy nos es imposible. Existen muchos retos y la realidad podría ser muy distinta a cómo la percibimos: universos paralelos, dimensiones ocultas a nuestros sentidos, branas y supercuerdas... No sabemos la respuesta, lo que sí sabemos es que aún estamos muy lejos de alcanzarla.

Pero antes de lanzarnos a este nivel 4 es interesante cerrar primero el nivel 3, entender bien lo que hemos alcanzado y descubrir los retos que se nos presentan en el futuro. ¿Estás listo?

Las revoluciones cuántica y relativista fueron el punto de partida para un siglo frenético cargado de grandes descubrimientos en física y que han perfilado la forma en que entendemos el cosmos. En 1896 Henri Becquerel da con la radiactividad de una forma casual. Situó sin un motivo especial unas sales de uranio encima de una placa fotográfica dentro de un cajón. En realidad, esperaba a que se fueran las nubes que le estaban impidiendo llevar a cabo los experimentos de fluorescencia y fosforescencia que estaba realizando con ayuda del sol. Cuando tomó las fotografías se habían velado. Pero si estaba todo a oscuras, ¿cómo podía ser?, ¿de dónde venía esa energía? Parecía que las sales de sodio estaban emitiendo algo..., pero eso era atentar contra el principio de conservación de la energía. Fueron necesarios trabajos en nuevos campos para poder entender la radiactividad y, muy en particular, explorar los dominios del núcleo para dar con una nueva fuerza: la fuerza débil. Gracias a la relatividad entendemos que esa energía que se desprende de los materiales radiactivos no es sino producto de la transformación masa-energía que

proviene de la famosa ecuación de Einstein. Con la fuerza débil entendemos cómo brilla el Sol y por qué algunas sustancias no son estables y se transforman espontáneamente en otras. Una fuerza muy débil y de corto alcance, que solo opera en el interior del núcleo. Algo más que solo con nuestros sentidos seríamos incapaces de comprender.

Cuando Ernest Rutherford y sus colaboradores, en la segunda década del siglo XX, se lanzan a entender mejor la composición de los átomos se llevan una sorpresa. Parece ser que los átomos son mayoritariamente espacio vacío con un núcleo duro que contiene la mayor parte de la masa del átomo. Más tarde se entendería que son protones, partículas de carga positiva, junto con neutrones, unas partículas de carga eléctrica neutra y muy parecidos por lo demás a los protones. Pero ¿cómo es posible que partículas de carga positiva como son los protones se mantengan unidos en el núcleo venciendo la repulsión eléctrica? Por la acción de una nueva fuerza: la fuerza fuerte. De nuevo una fuerza de corto alcance, que no se siente fuera del núcleo atómico, pero de gran intensidad. Eso hace que los protones se unan en el núcleo y que las energías nucleares sean enormes comparadas con las energías relativas a los enlaces químicos. La fuerza fuerte es nuevamente una fuerza que no experimentamos en el día a día, puesto que no tiene alcance fuera del núcleo atómico, pero que es fundamental para entender la formación de materia en el universo.

Ambas fuerzas fueron estudiadas y entendidas a lo largo del siglo XX con gran esfuerzo, puesto que para acceder a los misterios del núcleo se requerían colisiones cada vez más energéticas entre partículas. El desarrollo y la evolución de los aceleradores de partículas durante este siglo fue fundamental para recabar información necesaria sobre las interacciones débil y fuerte. El resultado fue un éxito, dos teorías, la electrodébil y la cronodinámica cuántica, que explican con gran precisión la interacción de partículas en el plano nuclear.

Estos grandes avances sobre los fenómenos a escala nuclear no vinieron solos. Conjuntamente, en esos experimentos de alta energía en los colisionadores se fue progresando a marchas forzadas en la comprensión de la composición de la materia. Se descubrió que los protones no son partículas fundamentales, como los electrones, sino que están compuestos por tres *quarks*, dos *up* y un *down*. A su vez, Fermi imaginó la existencia de una partícula fantasmagórica para poder entender las interacciones débiles sin que rompieran con el principio de conservación de la energía, la llamó neutrino, una partícula que apenas interactúa con la materia y que se produce en las desintegraciones radiactivas. Son cuatro partículas fundamentales, *quark up*, *quark down*, electrón y neutrino, que conforman la materia que conocemos en la Tierra. Colisionando partículas toparon con nuevos componentes fundamentales, réplicas más masivas de estas cuatro y a las que los físicos dieron nombres tan extraños como *quarks charm*, *strange*, *top* y *bottom*, muones y taus y otros dos neutrinos, el muónico y el tau.

Pero esto no es todo. Parece que la naturaleza de las partículas es completamente dual: el universo permite la existencia de lo que llamamos partículas de materia, pero también de sus «hermanas», las partículas de antimateria. Son partículas por lo demás iguales a las de materia, pero con carga contraria, y con una característica especial: partículas de materia y antimateria en contacto se aniquilan mutuamente.

Todo esto presentado aquí en pocas líneas conforma lo que se conoce como modelo estándar, posiblemente la teoría científica probada con mayor grado de precisión hasta el momento. El modelo estándar lo conforman la formulación matemática de las interacciones entre partículas (la fuerza fuerte con la cromodinámica cuántica y las fuerzas débil y electromagnética con la electrodinámica cuántica) y el conjunto de partículas fundamentales.

Hasta aquí nos ha llevado el nivel 3, la comprensión de todo lo que ocurre en el universo en términos de partículas e interacciones entre ellas. Con este conocimiento hemos sido capaces de teletransportar partículas, mandar información a larga distancia de forma inalámbrica, enviar sondas a Plutón y más allá, comprender el origen del universo... Hemos avanzado tanto, pero... ¿qué falta aún por conocer?

Muchas cosas. El modelo estándar es una teoría que fusiona la teoría de la relatividad especial y la teoría cuántica en lo que se conoce como una teoría cuántica de campos. Pero la relatividad general y, por lo tanto, la fuerza de la gravedad, sigue quedando fuera. Es necesaria una teoría cuántica de la gravedad para conseguir avanzar aún más en la comprensión del universo.

Desde hace tiempo sabemos que el universo se expande, es decir, todas las galaxias se alejan mutuamente entre sí. Pero no fue hace mucho que se descubrió que esta expansión es acelerada, es decir, cada vez las galaxias se alejan a mayor velocidad. ¿Qué tipo de energía produce esta expansión del propio espacio? Nadie lo sabe, y sigue siendo un gran misterio sobre el universo. Los científicos se lanzan a intentar descubrir y entender lo que han dado por llamar energía oscura, esa fuente de expansión acelerada en el universo y que daría cuenta de más del 70 % del contenido de materia-energía del universo.

Igualmente enigmático es el hecho de que las estrellas en las galaxias y las galaxias entre ellas parecen girar de una forma que no se corresponde con las leyes físicas conocidas, sino como si su masa fuera mucho mayor de la que aparentan tener por contenido de materia. La explicación más satisfactoria a día de hoy es que las galaxias se encuentran inmersas en un mar de materia oscura, un tipo de materia no contemplada en el modelo estándar y sobre el que poco más podemos decir que debe de ser materia sin carga eléctrica. Todas las estimaciones apuntan a que al menos el 80 % de la materia del universo sería de este tipo.

Materia y antimateria no pueden ser exactamente iguales, por más que se empeñan ambas en parecerse la una a la otra como dos gotas de agua. Han de ser diferentes, porque de lo contrario el Big Bang habría creado iguales cantidades de una y de otra y habrían acabado aniquilándose. Eso, o en algún rincón del universo ha de haber galaxias de antimateria con contenido equivalente al de materia que vemos. De momento la búsqueda resulta fallida en ambos casos, y el misterio de la antimateria continúa sin resolverse. Un misterio que parece ligado de alguna manera a la naturaleza de los neutrinos, unas partículas tan esquivas que continúan sin conocerse bien todas sus propiedades. Habrá que seguir estudiándolos con detalle.

El modelo estándar es engorroso. Un conjunto de ecuaciones con demasiados parámetros libres y en el aire la sensación de que no explica el funcionamiento de la naturaleza de forma suficientemente satisfactoria. ¿Por qué hay tres generaciones de partículas? ¿Por qué cada una tiene la masa que tiene? ¿Por qué las cosas son como son y no de otra forma? Pensemos en esta última pregunta. Si cambiáramos parámetros cósmicos como la intensidad de la fuerza electromagnética (constante de estructura fina) o la relación de masa entre protón y electrón, aunque el cambio fuera mínimo, el universo sería muy diferente, de hecho, sería hostil a la vida. Cambiando cada uno de esos parámetros llegaríamos a universos donde el hidrógeno se funde demasiado rápido o donde no se funde en absoluto, donde la gravedad comprime el universo hasta devolverlo al Big Bang o donde se expande tan rápido que no hay agregación efectiva de materia. Esto es lo que se conoce como *fine tuning*. La vida parece encontrarse en el alambre fino de la relación de parámetros exactos en el que está, y surge la pregunta: ¿por qué?, ¿simple casualidad? Se busca una teoría física que explique por qué el universo es como es y no de otra manera, una teoría que muestre algún rasgo de inevitabilidad: todos los

valores son los que son porque no pueden ser de otra manera, la teoría los restringe así, es forzosamente como es.

Se busca una nueva descripción del mundo que no necesariamente rompa con todo, sino que lo amplíe. En este sentido, pasa algo como lo que ocurrió con la física de Newton cuando llegó la relatividad de Einstein. La de Newton sigue siendo correcta, solo que es menos precisa, podemos decir que la de Einstein la engloba, de manera que la de Newton es un caso particular de la de Einstein. Haciendo la velocidad de la luz infinita, o en el límite en el que los cuerpos no se mueven, la relatividad de Einstein reproduce exactamente la física de Newton. Así que sería genial encontrar una teoría que englobe al modelo estándar, cubriendo sus carencias pero heredando sus éxitos.

Y en este punto llegamos al nivel 4, la superinteligencia. Que no sé, me lo estoy inventando, igual no existe en absoluto, pero igual sí. Al menos vamos a fantasear con ello. Hablo de un nivel de comprensión del universo para el que es posible que no estemos preparados evolutivamente hablando. Igual nuestro cerebro es demasiado primitivo para poder siquiera entenderlo. Piensa que biológica y tecnológicamente, y sin esperar ofender a nadie, acabamos de bajar del árbol. No han pasado ni doscientos años desde que empezamos a controlar la electricidad, lo cual en escalas cósmicas es el tiempo de un pestañeo. Ten en cuenta que a la Tierra aún le quedan 4.500 millones de años de existencia, lo que nos hace preguntarnos: ¿cómo seremos dentro de cuatro o cinco millones de años? ¿Y dentro de mil millones? Igual la evolución y la tecnología nos llevan a un tipo de superinteligencia con la que los límites de nuestro cerebro basado en las percepciones sensoriales de nuestro entorno escaso y reducido en fenómenos físicos ya no sean un estorbo o un impedimento. Quizás en ese momento tendremos acceso a otro tipo de razonamientos con los que podamos explorar de otra forma las leyes de la naturaleza y responder las preguntas que hoy ni siquiera estamos preparados para formular.

Sé que ardes en deseos de que dé algunos ejemplos..., pues vamos allá. Nuestro cerebro está perfectamente adaptado a las tres dimensiones del espacio. No hace ni cien años que hemos descubierto la cuarta dimensión, el tiempo. ¿Cómo sería un mundo con más dimensiones del espacio? Para que te des cuenta de lo difícil que es trabajar con algo así solo sigue este razonamiento lógico: en una dimensión tenemos un segmento; en dos dimensiones podríamos replicar ese segmento para formar un cuadrado; en tres dimensiones podríamos replicar el cuadrado para formar un cubo; en cuatro dimensiones... ¿Cómo sería un cubo en cuatro dimensiones espaciales? Es lo que se conoce como teseracto o hipercubo y no es fácil hacerse una idea del aspecto que tendría. Y para poder imaginar el poder que un ser que dominara las cuatro dimensiones tendría en nuestro mundo, solo hay que imaginar el poder que tendríamos nosotros en un mundo de dos dimensiones, un mundo confinado en la superficie de un papel. En ese papel los seres no entienden lo que es arriba y abajo, porque no lo pueden ver, para ellos no existe. Un ser como nosotros podría aparecer y desaparecer, actuar a su antojo en ese mundo de dos dimensiones. La realidad es que las teorías físicas parecen encajar bien en un mundo de tres dimensiones espaciales, pero no se puede descartar algo así, sobre todo teniendo en cuenta que muchas teorías científicas intentan ampliar el modelo estándar a base de suponer nuevas dimensiones ocultas a nuestros ojos, como la teoría de supercuerdas.

La teoría de supercuerdas proviene de la unión de la teoría de cuerdas con la supersimetría. La teoría de cuerdas tiene su origen a mediados del siglo XX. Un científico italiano, Gabriele Veneziano, da con la función beta de Euler de forma casual mientras intenta resolver un problema de física nuclear. Esa función encajaba a la perfección y Veneziano publica sus resultados. Años más tarde, Leonard Susskind indaga un poco más en el modelo de Veneziano

y descubre que representa una cuerda con vibración interna; es así como nace la teoría de cuerdas. La gran popularidad de esta teoría se debe a que con solo una cuerda vibrante la teoría sería capaz de explicar el funcionamiento de todo en el universo. Todas las partículas serían diferentes modos de vibración de esta cuerda. Así, igual que una misma cuerda se puede afinar en do, re, mi o la, una cuerda de la teoría de cuerdas vibraría de una forma para dar un electrón o un *quark*. Esto dota a la teoría de un grandísimo grado de simplicidad, no hay más que comparar con la monstruosa tabla del modelo estándar para darse cuenta. Y llega con un regalo bajo el brazo: en la teoría de cuerdas la relatividad de Einstein viene dada, es inevitable, no hay que imponer nada, surge de la propia descripción del espacio en la teoría de cuerdas. Así, la teoría de cuerdas es una teoría del todo, incluye la gravedad, así como el resto de fuerzas fundamentales, en un único marco teórico y dentro de la descripción cuántica de la materia.

El sufijo «súper» proviene de la supersimetría, una ampliación del modelo estándar en la que cada partícula tendría su supersimétrica, una partícula exactamente igual a sí misma salvo su masa, que sería mucho mayor, y su espín, una propiedad cuántica de la materia relacionada con su momento magnético. La supersimetría resuelve muchos de los problemas de la física moderna, pero genera uno muy grande también: nunca nadie ha visto una de estas partículas supersimétricas. ¿De verdad existirán? Por lo pronto parece un requisito necesario para la supervivencia de la teoría de supercuerdas.

Este no es el único obstáculo que ha de vencer la teoría de supercuerdas; como antes mencionamos, requiere de más dimensiones espaciales de las que hoy en día percibimos. En total, la teoría de cuerdas solo es posible en un universo de once dimensiones, ¿dónde están el resto de dimensiones? Una posibilidad es que fueran dimensiones compactificadas, esto es, muy pequeñas y cerradas sobre sí mismas, de modo que caminando por esa dimensión, si algo así fuera posible, en algún momento llegaríamos al punto desde el que salimos caminando siempre en la misma dirección. ¿Existen estas dimensiones? Pues por más que se buscan no aparecen. En los colisionadores de partículas se buscan pistas de su existencia. Una forma de detectar algo así sería por medio de una partícula que se fugara por una de estas dimensiones, otra, que se generara un microagujero negro, algo solo posible si existen más de tres dimensiones espaciales.

Ni dimensiones extra, ni superpartículas, ni cuerdas..., de momento no se ha observado nada de nada. Muy en parte, posiblemente, debido a que estas cuerdas y estas dimensiones son tan diminutas que no es fácil acceder a ellas. Se necesitarían energías varios millones de veces mayores que las que nos son accesibles en nuestros actuales colisionadores. Habrá que esperar.

Lo mismo ocurre con los universos paralelos, lo que se conoce como multiverso. Esto es de lo más popular dentro de la ciencia especulativa, esa parte de la ciencia no demostrada que bien pudiera ser verdad, pero tampoco nada garantiza que así lo sea. Se habla de universos paralelos como realidades que existen simultáneamente pero sin interacción. Y estos universos paralelos aparecen dentro de diferentes modelos. Por ejemplo, en cuántica, en la interpretación de los universos múltiples de Hugh Everett. Según la mecánica cuántica, un cuerpo puede existir en dos estados de forma simultánea hasta el momento en que es observado, momento en el que se dice que «colapsa» en uno de los dos estados. Por ejemplo, si pudiera ser roja y azul, una partícula sería las dos a la vez hasta que se observa, momento en el cual, por puro azar, toma uno u otro estado. Esto es lo que se conoce como interpretación de Copenhague, duramente atacada por Schrödinger con su paradoja del gato y que, como ves, suena un poco a magia. Para evitar ese momento mágico del colapso cuántico, Hugh Everett reinterpretó los resultados de los experimentos, proponiendo que lo que estaba ocurriendo era que en realidad

había un desdoblamiento de la realidad en dos universos, no una «elección azarosa». En un universo la partícula es azul, en el otro es roja. En ambos estaríamos nosotros, en uno con nuestra partícula roja, en el otro contentos porque salió azul. Según esta interpretación, cada vez que hay una situación parecida, el universo se replica, dando lugar a distintas realidades incapaces de interactuar. Al menos por el momento.

Los múltiples universos surgen en otro tipo de concepciones del mundo. Por ejemplo, para resolver el dilema de por qué el universo es cómo es, que antes planteamos, el problema del *fine tuning*. Igual existen infinitos universos donde en cada uno las constantes fundamentales son distintas. Entonces no sería casualidad que en uno de ellos las constantes fueran exactamente las precisas para que se diera la vida, simplemente que en infinitas realizaciones todos los resultados se dan. Esto encaja dentro del denominado «universo burbuja», diferentes realizaciones de universos corresponden con diferentes burbujas, separadas entre sí, en las que las constantes de la naturaleza y las condiciones iniciales son diferentes. Obviamente, estamos en ese afortunado universo, porque es el único donde podría haber seres que se pregunten por el sentido de la vida. Esto es una forma del denominado principio antrópico, no demasiado satisfactorio desde el punto de vista científico, pero que, una vez más, alude a la existencia de muchos universos.

También hay quien propone que los agujeros negros, objetos cósmicos que aún no comprendemos muy bien, podrían ser puertas a otros universos. Es más, hay teorías que apuntan que el Big Bang es en realidad una estrella que colapsó en otro universo, formando un agujero negro. De esta manera, cada vez que se forma un agujero negro por colapso de una estrella, la materia engullida se revierte en formar un nuevo universo. Un agujero negro, en este caso, sería una puerta para acceder a un nuevo universo.

Finalmente hay quien incluso se aventura a pensar que haya universos donde las realizaciones matemáticas sean diferentes, lo que daría lugar a universos con leyes físicas distintas entre sí. Como ves, las posibilidades son múltiples y las probabilidades de poder demostrar algo así, por el momento, muy bajas. Quizás algún día un físico de nivel 4 pueda desenredar esta maraña.

Hemos visto un ser humano de naturaleza física en el nivel 1, con reacciones inconscientes e instintos derivados de un pensamiento científico o que son producto de él. Un nivel 2, en el que hemos conocido a otro físico, en este caso formado, que ha usado su entorno como un libro y sus sentidos como sensores gracias a los cuales ha dibujado leyes y reglas que le permiten no solo entender lo que ocurre, sino incluso predecir lo que ocurrirá. Nos hemos acercado incluso a un nivel 3, en el que los físicos viajan más allá de sus sentidos y sus intuiciones para colarse en un dominio donde el cerebro es un extraño. Un físico, el del nivel 3, que lucha contra su propia intuición, que le juega malas pasadas, pero que a través de experimentos y el uso de la razón consigue adivinar unas reglas, aunque desafíen al propio sentido común. Y finalmente hemos tenido el placer de imaginar cómo sería un físico de nivel 4, si algo así pudiera existir. Sería un físico capaz de traspasar los límites de nuestro cerebro primitivo y colarse en dominios tan ajenos a nuestra existencia como los universos múltiples o las dimensiones extra. Un físico capaz de entender lo que hoy no podemos ni siquiera imaginar o expresar con palabras, un ser que nos vería como nosotros hoy vemos a un mono.

Llegó el momento explorar los límites del espacio y el tiempo.

9.
A modo de epílogo. De lo pequeño a lo grande

El aire roza tu piel y sientes cómo acaricia tu cara, el sol brilla y lo notas intenso aunque tienes los ojos cerrados. Los sonidos te envuelven en una atmósfera rica de estímulos, algunos suaves, otros estridentes, son los sonidos de la calle, de la frenética lucha del día a día en la que todos entramos continuamente. Se siente frío, pero un frío renovador, nada desagradable. Ya va cayendo la tarde y el cielo se llena de colores, estoy en la azotea de mi casa, un décimo piso, en realidad un ático, sobrevolando la ciudad de Madrid.

Soy doctor en física. Nací físico, como todos nosotros. Aunque en verdad puede que un poco más que la media. Amo la física, y la siento por todos mis poros. Entiendo la sensación que me produce ese aire, y conozco sus efectos, su temperatura, su conductividad térmica, la presión, y lo diferente a como sería nuestro mundo sin atmósfera. Noto los rayos de sol, y veo casi como un milagro su viaje desde el interior de una estrella promedio, donde se generan producto de una reacción nuclear, hasta la superficie de la estrella, atravesando el vacío durante 150 millones de kilómetros hasta tocar tu piel. Interiorizo los sonidos y entiendo su naturaleza, ya sea el de un portazo o cuando toco un nocturno de Chopin. Y lo hago porque me hace feliz saber que entiendo lo que siento. Entiendo quién soy, cómo soy y las reacciones de mi cuerpo ante los estímulos externos, en esa eterna lucha por responder a las grandes preguntas que siempre nos hicimos: ¿qué somos?, ¿de dónde venimos? y ¿adónde vamos?

Y para comprender completamente quienes somos y nuestro lugar en el cosmos hay que hacer un último viaje, abandonar la comodidad de nuestros dominios humanos y adentrarnos en mundos que no nos pertenecen, un viaje a los confines del tiempo y el espacio.

Primero fue la Tierra, que quedó desplazada a ser un planeta más girando en torno al Sol. A él también le tocó su turno, relegado a ser una estrella como otras del firmamento. Incluso nuestra galaxia, la Vía Láctea, no tiene nada de especial. Aunque esto último llegó hace bien poco. Es la década de 1920 y estaba naciendo un nuevo campo de la física, la cosmología.

Piensa que antes de la llegada de los grandes telescopios y de la relatividad general, las posibilidades de entender el universo eran mínimas. Y nuestros propios prejuicios no ayudaban mucho. Si uno mira al cielo estrellado, le embarga una sensación de tranquilidad completa. Mientras que aquí en la Tierra las cosas cambian a un ritmo frenético, en el cielo todo parece tan estático, inmutable. Es muy difícil no dejarse llevar por esa sensación de sosiego cuando uno imagina que aunque aquí todo va y viene, en el cielo tenemos nuestro refugio de eternidad. El firmamento es inmutable, las estrellas eran, son y serán siempre las mismas. Qué gran error.

Todo empezó a cambiar cuando pusieron los primeros grandes telescopios dirigidos a observar pequeños borrones en el cielo que llamaban nebulosas. Pudieron ver que en realidad estaban compuestas por muchas otras estrellas y que se encontraban más allá de nuestra propia galaxia. Eran, en realidad, otras galaxias. Fue entonces cuando el hombre fue consciente del verdadero tamaño del universo.

Es difícil imaginar la sensación de pequeñez que tuvo que sentir Edwin Hubble con su telescopio en el monte Wilson en esa década de 1920. De golpe, el universo cambió completamente a nuestros ojos. Su tamaño se multiplicó hasta la centena de miles de años luz[2] que consideramos que tiene en la actualidad el universo visible. Pasamos de una solitaria galaxia a los cientos de miles de millones, cada una con sus cientos de miles de millones de estrellas como el Sol, y cada estrella, posiblemente, con mundos tan ricos

como el nuestro. El universo es inmenso.

Pero esto no fue lo único que observó Hubble con su telescopio de 2,5 metros en el monte Wilson. Observando la luz emitida por las galaxias y su espectro, sus componentes en frecuencia, fue capaz de establecer lo que se conoce como ley de Hubble: todas las galaxias se alejan entre sí, a mayor velocidad cuanta mayor sea su distancia. Algo que George Lemaître, uno de los padres de la teoría del Big Bang, ya había observado: según la relatividad de Einstein el Universo debería estar expandiéndose a partir de un estado de máxima densidad, el origen del universo. La observación de la separación de las galaxias a mayor velocidad cuanto más lejos se encuentran es compatible con un universo en expansión sin centro, donde es el propio espacio el que se expande.

No fue fácil aceptar que el universo pueda estar en expansión. Creo que es muy humano aferrarse a un universo eterno, donde nacemos y morimos, pero la Tierra queda ahí, girando eternamente alrededor del Sol. Einstein se negó a aceptarlo, incluso alteró sus ecuaciones para evitar que el universo evolucionara, en lo que más tarde llamaría el mayor error de su vida. Pero las evidencias en ciencia mandan. Hoy nadie pone ya en serias dudas la teoría del Big Bang, un universo nacido de una violenta expansión hace 13.800 millones de años. Hemos visto las «cenizas» de ese Big Bang, el fondo cósmico de microondas, hemos visto la formación de las primeras galaxias y todas las observaciones apuntan a un inicio en el que el universo era infinitamente denso y caliente.

Son números que cuesta asimilar. Así que te recomiendo que tomes papel y boli y apuntes. Escribe: catorce mil millones de años, un 14 seguido de nueve ceros. Debajo escribe cinco mil millones de años, un 5 y nueve ceros, la edad del sistema solar y de la Tierra. Más abajo, doscientos mil años, el tiempo que lleva el *Homo sapiens* caminando sobre la Tierra. Y finalmente tres mil, el tiempo desde que dejamos de ser nómadas y vivimos coexistiendo en civilizaciones por el mundo. Acabamos de llegar. Si tuviéramos que encajar toda la historia del universo en un año, con su nacimiento el 1 de enero, el Sol comenzaría a brillar a principios de septiembre y toda la historia de la humanidad, reyes, conquistas, grandes inventos, plagas, revoluciones, tecnología..., ¡todo! cabría en los últimos segundos del año. Es normal que en estas escalas el cosmos parezca inmutable, nuestros ochenta años de vida sobre la Tierra son un pestañeo para el universo.

Y la misma sensación nos genera mirar al pasado... que hacia el futuro. Nos cuesta imaginar cómo será el mundo en treinta o cuarenta años, con lo frenéticos que son los cambios en nuestra civilización. Es un ejercicio de imaginación absurdo intentar recrear un mundo dentro de quinientos o mil años. Pero esto sigue siendo nada. Si el ser humano no se extingue, tiene tiempo por delante. El Sol seguirá brillando otros cuatro mil o cinco mil millones de años. Si cuesta trasladarnos en un futuro a quinientos años vista..., imagina a treinta mil, trescientos mil, cinco millones, quinientos millones o incluso dos mil millones de años. Es en este contexto en el que el nivel 4, esa superinteligencia, no parece tanto un sinsentido.

Y desde que el universo nació, no ha parado de crecer en tamaño. Y parece ser que lo hace de forma acelerada, es decir, cada vez a mayor velocidad. El universo observable tiene un diámetro de unos cien mil millones de años luz. En él se estima que podría haber unos cien mil millones de galaxias. La nuestra, la Vía Láctea, es una galaxia espiral de unos cien mil años luz de diámetro dentro de un grupo de galaxias que se denomina el Grupo Local, con unas treinta galaxias, entre ellas nuestra vecina Andrómeda. Este Grupo Local, además, pertenece al supercúmulo de Virgo, nuestra pandilla de galaxias en el universo.

Dentro de la Vía Láctea, el Sol se encuentra en el brazo Orión, a unos

veinticinco mil años luz del centro. Hay tantas estrellas en nuestra galaxia (varios cientos de miles de millones) que la Vía Láctea se ve como una mancha blanca en el cielo nocturno. Estamos viendo nuestro plano galáctico. El resto de estrellas, esas constelaciones que nombramos, como la Osa Mayor o la constelación de Orión, son estrellas vecinas, las más cercanas a la Tierra, y aunque las agrupamos en forma de constelaciones, muchas de ellas se encuentran a gran distancia entre sí. Esto es todo lo que nuestro ojo desnudo puede descifrar sobre el universo, estrellas como Alfa Centauri, el grupo más cercano a nosotros, a poco más de cuatro años luz de distancia, o Sirio, la estrella más brillante del firmamento después del Sol.

La estrella más cercana a cuatro años luz..., ¡sí que es inmenso el universo! Para que te hagas una idea, si el sistema solar tuviera el tamaño de una moneda de un céntimo de euro, la Vía Láctea tendría el tamaño de la península ibérica y nuestra vecina Andrómeda estaría más o menos tan lejos como Nueva Zelanda. Solo cuando pensamos en distancias a estas escalas somos conscientes de la inmensidad del cosmos.

Distancias cósmicas y números astronómicos es lo que hace que nos veamos tan pequeños. Pero cuando miramos hacia nosotros mismos... ¿no somos un universo en miniatura? Hay más átomos en nuestro cuerpo que estrellas en el universo, y casi podría decirse que somos espacio vacío.

Tenemos del orden de 10^{27} átomos en nuestro cuerpo, esto es una cantidad brutal. Y es posible porque los átomos son verdaderamente pequeños, del orden del ángstrom, 10^{-10} metros. Están formados por un núcleo de carga positiva, con protones y neutrones, y electrones en igual número al de protones orbitando a cierta distancia. Los núcleos atómicos son unas diez mil veces más pequeños que los átomos, con lo cual hay que imaginar a estos como formados, principalmente, de espacio vacío. Imagina un átomo del tamaño de un estadio de fútbol, el núcleo sería la cabeza de un alfiler en el centro del campo y los electrones estarían corriendo por las gradas. El resto... sería espacio vacío.

Los átomos se unen entre sí para formar moléculas, algunas muy simples, como la de agua, otras tan complejas como tu mente pueda imaginar, con cientos de miles de átomos. Las moléculas se unen para formar células y las células para formar tejidos y con ellos órganos. Esos órganos especializados se han unido de una forma muy característica para formarte a ti, un físico.

Pero ¿de dónde vienen esos átomos? Toda la materia del universo se formó en las primeras fracciones de segundo del inicio del universo en forma de sopa desordenada de partículas. Se tardaron varios cientos de miles de años en que la sopa se enfriara y diera lugar a los primeros compuestos: hidrógeno, deuterio, tritio, helio, litio, berilio... Fue casi todo hidrógeno, un 75 %, seguido de helio, otro 25 % aproximadamente; así es como empezó a evolucionar la materia en el cosmos, y la gravedad... hizo el resto. Nubes de gases de estos elementos fueron arremolinándose y apretándose en una danza cósmica, fruto de la atracción gravitatoria. Cuando la presión fue suficientemente intensa... se hizo la luz: esta nube de gas que llamamos protoestrella comienza a brillar, ha nacido una estrella. Así nacieron las primeras estrellas y las primeras galaxias. En esta joven estrella el hidrógeno se fusiona en helio, emitiendo la energía sobrante en forma de luz y calor. Esta es una de las labores de las estrellas en los planes cósmicos: son los hornos donde se cocinan los elementos. Hidrógeno para dar helio, helio para dar carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo, hierro... La fusión de los elementos simples en el corazón de las estrellas para dar elementos más pesados hace posible la existencia de seres vivos que requieren de estructuras complejas para existir. Nuestros átomos de carbono, oxígeno, fósforo... se cocinaron a fuego lento, en procesos que duraron miles de millones de años, en el corazón de varias estrellas.

Todos esos átomos que te forman a ti y todo lo que te rodea fueron parte un

tiempo atrás de una estrella muy caliente que acabó estallando en una supernova. Incluso viajando más hacia el pasado podemos imaginar esos mismos protones, neutrones y electrones de tu cuerpo en una sopa caliente y densa parte del universo primitivo, antes de que en este pequeño rincón del mundo se reordenaran para darte forma a ti, un físico.

La menor expresión de tu cuerpo, los átomos, fueron formados en la más energética de las actividades cósmicas, las supernovas. Los misterios más grandes sobre el orden universal están escritos en las estructuras más pequeñas de la naturaleza, las partículas. Es entendiendo el funcionamiento de los mínimos componentes de la materia como podemos abrir los ojos a la verdad sobre el universo; es a raíz de comprender la estructura del universo como podemos encontrar sentido a la composición de la materia. Aunque suene contradictorio, en el universo lo infinitamente pequeño está íntima e inexorablemente unido a lo descomunalmente grande.

Se dice que un físico es la forma que tiene una célula de saber lo que es una célula. Somos un universo en nosotros mismos y parte de uno mayor que compartimos. Por eso también tiene sentido decir, como decía Carl Sagan, que un físico es la forma que tiene el cosmos de conocerse a sí mismo. Ahora que ya sabes todo esto, y que sabes que eres un físico, seguramente más avanzado de lo que podías imaginar, ya estás listo para descubrir las maravillas de la naturaleza y del cosmos. Y disfrutar de la física que nos rodea, porque el mundo es aún más bello cuando lo observamos entendiendo el lenguaje en el que está escrito.

Ha llegado al final de este título
Haga clic aquí para dejar una evaluación y ver títulos relacionados

Notas

1.

La frecuencia se define como el número de ciclos por segundo en un fenómeno repetitivo, por ejemplo, en un péndulo sería el número de veces que pasa por la posición inicial durante un segundo. Para ondas podemos usar indistintamente longitud de onda (lambda) o frecuencia (f), puesto que están relacionadas (lambda = $v\,f$). Mientras que para la luz se usa por comodidad la longitud de onda, para el sonido se suele hablar de frecuencia, pero es únicamente por motivos de comodidad. La longitud de onda de los sonidos es mucho mayor que la de la luz visible, lo cual explica que puedas oír detrás de una puerta o desde otra habitación, pero no ver.

2.

Un año luz es la distancia que recorre la luz en un año, unos 10 billones de kilómetros.